



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽERNÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY  
A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ ATMOSFÉRICKÝCH REZISTORŮ

DESIGN OF STAND FOR ATMOSPHERIC RESISTORS TESTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILAN KEREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, PhD

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/15

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Milan Kerek

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh zařízení pro testování atmosférických rezistorů**

v anglickém jazyce:

### **Design of stand for atmospheric resistors testing**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou automatizace výrobních testů atmosférických rezistorů. Na základě analýzy parametrů atmosférických rezistorů, které je nutné testovat, bude definována specifikace testeru. Na základě specifikace bude navržena pneumatická a mechanická část testeru, zvolen DAQ hardware a navržen a realizován software pro automatizované testování atmosférických rezistorů.

Cíle diplomové práce:

1. Seznamte se funkcí atmosférických rezistorů, měření průtoku plynů a měření tlaku plynů.
2. Navrhněte uspořádání testeru pro kontrolu funkce atmosférických rezistorů, řešte volbu snímačů a pneumatických prvků při dodržení požadavků ANSI ISA – BS EN 60534 a interními předpisy společnosti CCI.
3. Realizujte podklady pro výrobu pneumatického obvodu a mechanických částí navrženého testeru.
4. Navrhněte a realizujte software pro navržený tester, proveďte ověření testeru.
5. Zhodnoťte parametry realizovaného testeru a posuďte ekonomický přínos.

Seznam odborné literatury:

- [1] SHELL, Richard L a Ernest L HALL. Handbook of industrial automation. New York: M. Dekker, c2000, xii, 900 p. ISBN 0-8247-0373-1.
- [2] BLACK, Rex a Ernest L HALL. Managing the testing process: practical tools and techniques for managing hardware and software testing. 2nd ed. New York: Wiley, c2002, xxvii, 500 p. ISBN 04-712-2398-0.
- [3] HAYES, By Linda G. a Ernest L HALL. The automated testing handbook: practical tools and techniques for managing hardware and software testing. 2nd ed. Richardson, TX: Software Testing Institute, 2004, xxvii, 500 p. ISBN 09-707-4650-4.
- [4] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. LabView advanced programming techniques. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007, 499 s. ISBN 08-493-3325-3.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 25.11.2014

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan

## Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom a výrobou testovacieho na testovanie a overenie správnosti prietokového koeficientu atmosférických rezistorov vyrábaných spoločnosťou IMI CCI Czech Republic. Atmosférický rezistor, tiež nazývaný disk stack, je súbor diskov navrstvených na sebe, cez ktoré prúdi médium a systém labyrintov v jednotlivých vrstvách spôsobuje postupné znižovanie tlaku prúdiacej tekutiny.

V práci je popísaný návrh mechanických častí testovacieho zariadenia, voľba prvkov pneumatického obvodu a zvolenie hardwaru na meranie potrebných veličín, ktorými sú prietok, vstupný a výstupný tlak, teplota. V prostredí LabVIEW bol vytvorený software pre sber, analýzu a vyhodnotenie nameraných dát. V závere je prevedenie merania a otestovanie funkčnosti testovacieho zariadenia a softwaru.

## Kľúčové slová

Prietok, tlak, prietokový koeficient, teplota, testovacie zariadenie, LabView, cDAQ, atmosférický rezistor, disk stack, ventil, C Series Modules

## Abstract

This master's thesis deals with the design and manufacture of device for testing and verification of functionality of atmospheric resistors produced by IMI CCI Czech Republic. An atmospheric resistor, also called disk stack, is a stack of disks through which the medium flows and the system of labyrinths in disk stack causing a pressure reduction of medium.

This thesis describe design of the mechanical parts of stand for atmospheric resistors, choice pneumatic circuit's components, data acquisition hardware for measuring flow, inlet and outlet pressure, and temperature. The software was created in LabVIEW programming environment. In the end of this paper was done measurement in order to test functionality of test stand and software.

## Key words

Flow, pressure, temperature, test stand, LabVIEW, cDAQ, atmospheric resistor, disk stack, valve, C Series Modules

## **Bibliografická citácia**

KEREK, M. Návrh zařízení pro testování atmosférických rezistorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D..

## **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne na základe pokynov a rád vedúceho práce Ing. Pavel Houška, Ph.D. a že som všetky použité literárne a internetové zdroje uviedol v zozname použitej literatúry.

V Brne, dňa:.....

Podpis:.....

## **Pod'akovanie**

Touto cestou by som sa chcel pod'akovať Jirkovi Lefnerovi, za umožnenie vypracovania tejto práce, Tomášovi Novákovi za cenné pripomienky a rady počas tvorby testovacieho zariadenia. Ďalej by som tiež rád pod'akoval Ing. Pavel Houška, PhD za pomoc a vedenie diplomovej práce.

Na tomto mieste chcem tiež pod'akovať rodičom a svojej priateľke za motiváciu a morálnu podporu.

# Obsah

1	ÚVOD .....	1
1.1	Ciele práce .....	2
2	ÚVOD DO ZÁKLADNEJ TEÓRIE PLYNOV .....	3
2.1	Základné vlastnosti plynov a termodynamické vzťahy .....	3
2.1.1	Vlastnosti plyných látok .....	3
2.1.2	Boyl-Mariottov zákon .....	3
2.1.3	Gay Lussacov zákon .....	4
2.1.4	Charlesov zákon .....	4
2.1.5	Stavová rovnica ideálneho plynu .....	4
2.2	Meranie prietoku tekutín .....	5
2.2.1	Tekutina .....	5
2.2.2	Prietok .....	5
2.2.3	Rýchlostný prietok .....	5
2.2.4	Objemový prietok .....	5
2.2.5	Hmotnostný prietok .....	6
2.2.6	Reynoldsové číslo .....	6
2.3	Prúdenie .....	6
2.3.1	Laminárne prúdenie .....	6
2.3.2	Turbulentné prúdenie .....	7
3	ATMOSFÉRICKÉ REZISTORY .....	8
3.1	Motivácia .....	8
3.2	DRAG® technológia .....	8
3.3	Účinnosť použitia DRAG® atmosférického rezistoru .....	9
4	NÁVRH USPORIADANIA PNEUMATICKÉHO OBVODU A VOĽBA PNEUMATICKÝCH PRVKOV .....	11
4.1	Popis usporiadania testovacieho zariadenia podľa EN 60534 a procedúry TP - 522 .....	11
4.2	Koncepcia usporiadania testovacieho zariadenia .....	12
5	VOĽBA SNÍMAČOV A PNEUMATICKÝCH PRVKOV .....	14
5.1	Regulátor tlaku vzduchu .....	14
5.2	Vzduchový filter .....	14
5.3	Proporcionálny ventil VP – 60 .....	14
5.4	Uzatvárací elektromagnetický sedlový ventil .....	15
5.5	Termočlánok .....	15
5.6	Meranie prietoku plynov .....	16
5.6.1	Tepelné hmotnostné prietokomery .....	16

5.6.1.1	Kalorimetrické hmotnostné prietokomery .....	16
5.6.1.2	Hmotnostný termoanemometer .....	17
5.6.2	Požiadavky na prietokomery pneumatického obvodu .....	18
5.6.3	SmartTrak® Series 100 .....	18
5.6.4	OMEGA FMA – 1600 A .....	19
5.6.5	Bronkhorst EL-FLOW® Series .....	20
5.6.6	Bronkhorst MASS-VIEW Series .....	21
5.6.7	Výber prietokomeru .....	21
5.7	Meranie tlaku plynov .....	22
5.7.1	Snímače tlaku s elektrickým výstupom .....	22
5.7.1.1	Tlakomery s potenciometrickým a indukčným senzorom polohy .....	22
5.7.1.2	Kapacitné snímače tlaku .....	23
5.7.1.3	Piezoelektrické snímače tlaku .....	24
5.7.2	Požiadavky na snímače tlaku .....	24
5.7.3	Snímač tlaku OMEGA DPGM409 .....	24
5.7.4	Snímač tlaku SenzoMitter AS .....	25
5.7.5	Snímač tlaku BHV DMP 331 .....	26
5.7.6	Výber prietokomeru .....	27
5.8	Kalibrácia snímačov .....	27
5.9	Realizácia pneumatického obvodu .....	27
6	NÁVRH MECHANICKEJ ČASTI TESTOVACIEHO ZARIADENIA .....	29
6.1	Testované atmosférické rezistory .....	29
6.2	Základná koncepcia testovacieho zariadenia .....	29
6.2.1	Výpočet rozmerov testovacieho zariadenia .....	31
6.3	Návrh testovacej komory .....	31
7	AUTOMATIZÁCIA MERACIEHO ZARIADENIA .....	34
7.1	Voľba hardwaru .....	34
7.1.1	cDAQ 9174 .....	34
7.1.2	C Series Module NI 9203 .....	35
7.1.3	C Series Module NI 9265 .....	35
7.1.4	C Series Module NI 9219 .....	36
7.1.5	C Series Module 9375 .....	36
7.2	Ochranné prvky meracieho hardwaru .....	36
7.3	Zapojenie meracej časti .....	37
8	REALIZÁCIA SOFTWARE A OVERENIE TESTOVACIEHO ZARIADENIA .....	38
8.1	Požiadavky na funkcie softwaru .....	38
8.2	Riadenie vykonávania funkcií programu .....	38



8.2.1	Udalosťami riadené programovanie.....	38
8.2.2	Udalosť.....	38
8.3	Nastavenie komunikácie s C Series Modulmi .....	40
8.4	Spracovanie výstupného analógového signálu snímačov.....	40
8.4.1	Filtrácia signálu pomocou analógového filtra .....	40
8.4.2	Filtrácia šumu analógového signálu pomocou digitálneho filtra.....	41
8.5	Zápis dát do súboru.....	42
8.6	Popis programu a merania .....	42
9	OVERENIE FUNKČNOSTI TESTOVACIEHO ZARIADENIA .....	43
10	ZHODNOTENIE PARAMETROV TESTOVACIEHO ZARIADENIA A POSÚDENIE EKONOMICKÉHO PRÍNOSU .....	45
11	ZÁVER .....	47
12	POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE.....	48
13	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV .....	51
14	ZOZNAM OBRÁZKOV .....	53
15	ZOZNAM TABULIEK .....	55
16	ZOZNAM PRÍLOH .....	56

# 1 Úvod

Ťažba nerastných surovín sa každým rokom presúva hlbšie pod zemský povrch, čím sa výrazne zvyšuje potrebný tlak a rýchlosť ťaženého média v potrubných systémoch. Zariadenia na ťažobných súpravách ako sú vysoko tlakové ventily, ktoré ako prvé prichádzajú do styku s ťaženou surovinou musia spĺňať prísne tlakové, emisné a bezpečnostné požiadavky.

Vysoký tlak a nekontrolovaná rýchlosť prúdiaceho média spôsobujú degradáciu materiálu vo vnútri ventilu v podobe erózie a kavitácie, ako aj ku vzniku nadmerného hluku a vibrácií na zariadení. Preto sa z týchto dôvodov sa používajú na elimináciu uvedených nežiaducich javov atmosférické rezistory.

Atmosférický rezistor je zariadenie pozostávajúce z určitého počtu diskov kruhového prierezu s medzikružím, ktoré sú na sebe navrstvené. Každý disk, ktorý je súčasťou rezistora má na svojom povrchu vypálené labyrinty cestičiek, kde každý labyrint má definovaný počet zatáčiek. Prúdiace médium, ktoré prúdi pod vysokým tlakom vstupuje z vonkajšej strany rezistoru do labyrintov, kde v jednotlivých zatáčkach dochádza k postupnému znižovaniu tlaku.

Hlavným parametrom, ktorý definuje vlastnosti atmosférického rezistoru je prietokový koeficient  $C_v$ . Prietokový koeficient nám dáva informáciu o tom, koľko množstva média pretečie danou armatúrou za jednotku času. Pri návrhu atmosférického rezistoru dizajnér analyticky určí hodnotu prietokového koeficientu podľa požiadaviek zákazníka a aplikácie, v ktorej bude použitý. Teoreticky určenú hodnotu  $C_v$  je preto nutné experimentálne overiť.

Preto spoločnosť IMI CCI Czech Republic, v ktorej som zamestnaný na pozícii testovacieho inžiniera zadala projekt, ktorého cieľom je navrhnuť testovacie zariadenie pre atmosférické rezistory s prietokovým koeficientom  $C_v < 10$  schopné overiť funkčnosť a správnosť vypočítanej hodnoty prietokového koeficientu.

Táto práca je zameraná na návrh kompletného testovacieho zariadenia, ktoré spĺňa požiadavky definované v internej procedúre TP-522 spoločnosti IMI CCI ako aj normu EN 60534. Testovacie zariadenie je rozdelené na tri hlavné časti – mechanická časť, pneumatická časť, časť obsahujúca merací hardware. Súčasťou zariadenia je aj software na zber a analýzu dát.

Mechanická časť testovacieho zariadenia je tvorená komorou, do ktorej sa nainštaluje a následne uchyťí testovaný atmosférický rezistor pomocou skrutkového spoja a zátky. Na výstupnej strane komory je meraný atmosférický tlak. Stlačený vzduch je privedený na vstup pneumatického obvodu. Pomocou regulátoru tlaku sa nastaví požadovaný výstupný tlak. Vzduch ďalej prúdi cez filter do proporcionálneho ventilu, ktorým regulujeme prietok a tým aj tlak vo vnútri testovacej komory. Prietok prúdiaceho média je zaznamenávaný jedným z troch prietokomerov s rozdielnym meracím rozsahom. Merané veličiny sú zaznamenávané pomocou hardwaru od National Instruments a následne vyhodnotené v softvare vytvorenom v prostredí LabVIEW.

Potvrdenie resp. vyvrátenie zhody teoreticky vypočítanej hodnoty prietokového koeficientu a reálnej nameranej hodnoty pomôže v ďalšom rozvoji a vývoji metódy postupného znižovania tlaku prúdiaceho média vo ventile.

## 1.1 Ciele práce

Motiváciou tejto práce je návrh funkčného výrobného testu atmosférických rezistorov. Cieľom teda je vytvoriť testovacie zariadenie, pomocou ktorého budeme môcť určiť správnu funkčnosť atmosférického rezistoru a potvrdiť zhodu analyticky určeného prietokového koeficientu.

Z tohto hlavného cieľa vyplývajú pod úlohy práce, ktoré sú obsiahnuté v zadaní:

1. Zoznámenie sa s funkciou atmosférických rezistorov, meranie prietokov plynov a meranie tlakov plynov
2. Návrh usporiadania testeru pre kontrolu funkcie atmosférických rezistorov. Zvoliť vhodné snímače a prvky pneumatického obvodu pri dodržaní požiadavkou EN 60534 a internými predpismi spoločnosti CCI.
3. Realizovať podklady pre výroby pneumatického obvodu a mechanických častí navrhnutého testeru
4. Navrhnuť a realizovať software pre navrhnutý tester a predviesť overenie.
5. Zhodnotiť parametre realizovaného testeru a posúdiť ekonomický prínos.

## 2 Úvod do základnej teórie plynov

Oproti kvapalinám, patrí meranie prietoku plynov k zložitejším problémom v oblasti meracej techniky. Preto považujem za dôležité spomenúť základné vlastnosti plynov, termodynamické zákony, ktorých porozumenie nám pomôže pochopiť vlastnosti prúdiaceho plynu potrubím.

### 2.1 Základné vlastnosti plynov a termodynamické vzťahy

Je obecné známe, že plyn je stlačiteľný a objem plynu výrazne závisí na teplote. Jednotlivé závislosti medzi objemom  $V$ , teplotou  $T$  a tlakom  $P$  plynu nám popisujú termodynamické zákony. V tejto kapitole sa zameriame na základné vlastnosti plynov a definujeme termodynamické zákony, ktoré popisujú chovanie plynov za rôznych podmienok.

#### 2.1.1 Vlastnosti plynných látok

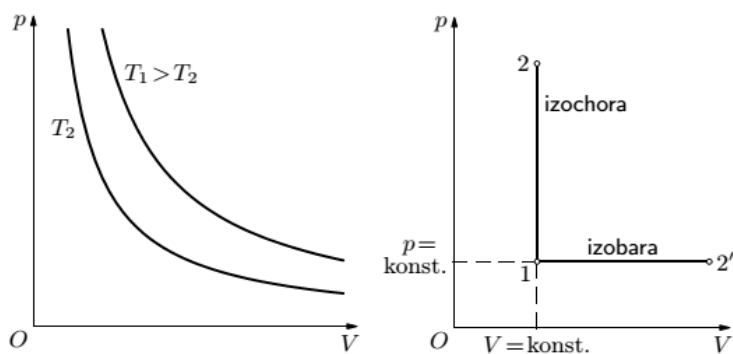
Plyn je jedným zo štyroch základných stavov hmoty. Je to látka, ktorej elementárne častice sú relatívne ďaleko od seba a ich kinetická energia je väčšia ako potenciálna energia. Z tohto vyplývajú určité vlastnosti plynov:

- Stlačiteľnosť
- Premenný tvar – prispôbujú sa tvaru nádoby
- Nemajú vlastný objem – vždy vyplňajú objem nádoby
- Nízka hustota a viskozita

#### 2.1.2 Boyle-Mariottov zákon

Boyle-Mariottov zákon vyjadruje závislosť objemu plynu  $V$  danej hmotnosti na jeho tlaku  $p$  za predpokladu, že termodynamická teplota plynu  $T$  je konštantná. Takýto dej sa nazýva *izotermický dej* a daný vzťahom 2.1. [1]

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \Rightarrow p \cdot V = \text{konst} \quad (2.1)$$



Obr. 2.1: Izoterma ideálneho plynu vľavo, izochora a izobara ideálneho plynu vpravo [1]

### 2.1.3 Gay Lussacov zákon

Gay Lussacov zákon popisuje závislosť objemu plynu  $V$  na termodynamickú teplotu  $T$ , za podmienky konštantného tlaku plynu  $p$ . Tento dej sa nazýva izobarický dej a je daný nasledujúcim vzťahom 2.2. [1]

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{V}{T} = konst \quad (2.2)$$

### 2.1.4 Charlesov zákon

Charlesov zákon popisuje závislosť tlaku plynu  $p$  danej hmotnosti na termodynamickú teplotu  $T$ , za podmienky konštantného objemu  $V$ . Tento dej sa nazýva izochorický dej a je daný nasledujúcim vzťahom 2.3.[1]

$$\frac{p_1}{V_1} = \frac{p_2}{V_2} \Rightarrow \frac{p}{V} = konst \quad (2.3)$$

### 2.1.5 Stavová rovnica ideálneho plynu

Stavová rovnica navzájom kombinuje stavové veličiny ideálneho plynu – objem  $V$ , termodynamickú teplotu  $T$  a tlak  $p$ , čo umožňuje určiť zmenu jednej stavovej veličiny za rôznych podmienok. Z Boyle-Mariottovho vzťahu 2.1 a Gay Lussacovho vzťahu 2.2 vyplýva stavová rovnica v základnom tvare.

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{p \cdot V}{T} = konst \quad (2.4)$$

K určeniu konštanty pre plyn s látkovým množstvom  $n = 1[\text{mol}]$ , predpokladáme nasledujúce normálne podmienky [2]:

$T = 273,15$	termodynamická teplota	[K]
$V_m = 22,4 \cdot 10^{-3}$	molárny objem	[mol <sup>-1</sup> ]
$p = 101\,325$	atmosférický tlak	[pa]

Tabuľka 2.1: Štandardné podmienky merania plynu

Dosadením hodnôt z tabuľky 2.1 do vzťahu 2.4 dostaneme konštantu, ktorá sa nazýva molárna plynová konštanta  $R_m$  a je pre všetky plyny rovnaká.

$$\frac{p \cdot V}{T} = 8,31 \Rightarrow R_m \quad (2.5)$$

Upravením stavovej rovnice 2.4 a dosadením do vzťahu 2.6 dostaneme tvar stavovej rovnice 2.7 pre látkové množstvo  $n$  1 mol ideálneho plynu

$$V_m = \frac{V}{n} \quad [\text{mol}^{-1}] \quad (2.6)$$

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad [\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (2.7)$$

## 2.2 Meranie prietoku tekutín

Problematika merania prietoku tekutín používa niekoľko termínov, s ktorými je sa vhodné zoznámiť a definovať. V nasledujúcej kapitole sú tiež popísané jednotlivé typy prietokov a ich určenie pomocou matematických vzťahov

### 2.2.1 Tekutina

Pojmom tekutina označujeme spoločný názov pre kvapaliny, plyny a pary. Významnou vlastnosťou tekutín je tekutosť, ktorá je spôsobená zvýšenou vzájomnou pohyblivosťou elementárnych častíc danej látky. Z tohto dôvodu tekutiny nemajú špecifický tvar a dokážu sa prispôbovať tvaru okolia, v ktorom sa nachádzajú (nádoba, prostredie).[3]

### 2.2.2 Prietok

Prietok definuje množstvo tekutiny, ktorá pretečie potrubím alebo otvoreným kanálom za určitú časovú jednotku. Prietok môže byť definovaný v objemových, hmotnostných alebo rýchlostných jednotkách.

### 2.2.3 Rýchlostný prietok

Rýchlostný prietok udáva strednú hodnotu rýchlosti prúdenia tekutiny označovanú  $w$ . Na základe znalosti strednej hodnoty rýchlosti prúdenia  $w$ , môžeme určiť objemový  $Q_V$  a hmotnostný  $Q_m$  prietok. Jednotka strednej rýchlosti prúdenia tekutiny  $w$  je  $[m^3 s^{-1}]$ . [3]

### 2.2.4 Objemový prietok

Objemový prietok  $Q_V$  je definovaný ako podiel objemu látky  $V$ , ktorá pretečie potrubím daného prierezu  $S$  za určitý čas  $\Delta t$ . Objemový prietok môžeme určiť napr. pomocou dávkovacích prietokomerov alebo nepriamo vypočítať zo strednej hodnoty rýchlosti prúdenia tekutiny potrubím o známom priereze. Avšak, pri zisťovaní objemového prietoku predpokladáme, že tekutina zaplňuje celé potrubie meraného úseku. V praxi, tento predpoklad, nie je vždy splnený. [1, 3]

$$Q_V = \frac{V}{\Delta t} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2.8)$$

V prípade, že je prietokomer vybavený integračným zariadením, výstupná hodnota udáva pretečené množstvo dané nasledujúcim vzťahom 2.9. [3]

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V dt \quad [m^3] \quad (2.9)$$

### 2.2.5 Hmotnostný prietok

Hmotnostný prietok  $Q_m$  je definovaný ako hmotnosť tekutiny, ktorá pretečie potrubím daného prierezu  $S$  za určitý čas  $\Delta t$ . K priamemu určeniu hmotnostného prietoku je možné využiť tepelné hmotnostné prietokomery a prietokomery založené na Coriolisovom princípe. Hmotnostný prietok je možné určiť nepriamo výpočtom, na základe znalosti objemového prietoku  $Q_V$  a zo známej hustoty prúdiacej tekutiny  $\rho$ . [1, 5]

$$Q_m = Q_V \cdot \rho \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.10)$$

Ak je hmotnostný prietokomer vybavený integračným zariadením, tak výstupná hodnota udáva pretečené množstvo dané nasledujúcim vzťahom 2.11 podľa [4].

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad [\text{kg}] \quad (2.11)$$

### 2.2.6 Reynoldsové číslo

Na základe znalosti Reynoldsovho čísla posudzujeme druh prúdenia, ktorý vzniká v tekutine napr. pri trení v potrubiach, regulačných prvkoch apod. Reynoldsové číslo je bezrozmerná veličina definovaná vzťahom 2.12 podľa [6].

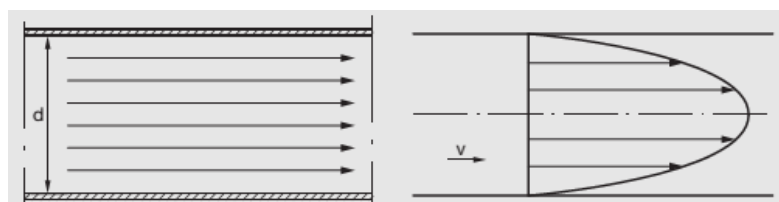
$$R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\eta} \quad [-] \quad (2.12)$$

## 2.3 Prúdenie

Prúdenie je pohyb elementárnych častíc tekutiny, pri ktorom sa posúvajú neusporiadaným pohybom v smere prúdenia. Podľa Reynoldsovho čísla môžeme určiť dva typy prúdenia – laminárne a turbulentné prúdenie. Na prúdenie má veľký vplyv tzv. medzná vrstva, ktorá sa nachádza na prelome styku tekutiny a vnútorného priemeru potrubia. V tejto oblasti dochádza k výraznému rýchlostnému spádu tekutiny, ktorý je spôsobený viskozitou tekutiny, adhéziou a trením v medznej vrstve. [1, 6]

### 2.3.1 Laminárne prúdenie

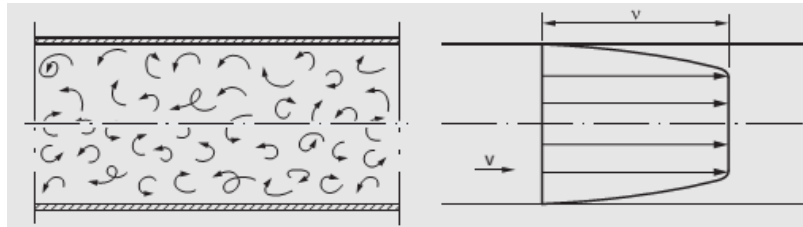
Laminárne prúdenie je charakteristické tým, že sa častice tekutiny pohybujú v usporiadaných, navzájom susediacich vrstvách. Laminárne prúdenie sa vyskytuje prevažne pri nízkych rýchlostiach prúdenia. Je to najmä preto, že pri nízkych rýchlostiach sa turbulentné víry úplne nerozvinú. Laminárne prúdenie nastáva v prípade, že Reynoldsové číslo je  $Re < 2320$ . Z obr. 1.2 môžeme vidieť, že laminárne prúdenie má parabolický rýchlostný profil a najvyššiu rýchlosť tekutina dosahuje v osi potrubia. [6]



Obr. 2.2: Laminárne prúdenie a jeho rýchlostný profil [6]

### 2.3.2 Turbulentné prúdenie

U turbulentného prúdenia dochádza k náhodnému prechodu častíc tekutiny z jednej vrstvy do druhej, čo vedie k vytváraniu vírov. Dochádza k pohybu častíc aj v proti smere prúdenia tekutiny. Zvyčajne k turbulentnému prúdeniu dochádza pri vysokých teplotách alebo nízkej viskozite tekutiny. Pre turbulentné prúdenie je Reynoldsové číslo  $Re > 2320$ . Rýchlosť prúdenia v meznej vrstve zrýchľuje z nulovej rýchlosti na konečnú hodnotu  $v$ , čo výrazne ovplyvňuje aj rýchlostný profil prúdenia. [6]



Obr. 2.3: Turbulentné prúdenie a jeho rýchlostný profil [6]



### 3 Atmosférické rezistory

Cieľom v nasledujúcej kapitole je bližšie popísať technológiu a princíp fungovania atmosférických rezistorov. Keďže sa jedná o prácu pre spoločnosť IMI CCI Czech Republic a nie je možné uverejňovať interné dokumenty spoločnosti je táto kapitola vypracovaná z voľne dostupných zdrojov ako sú brožúry, manuály, propagačné materiály a pod.

#### 3.1 Motivácia

V súčasnosti, kedy sa ťažba nerastných surovín akými sú ropa, zemný plyn presúva hlbšie pod zemský povrch, kde sú kladené vysoké požiadavky na vyššie pracovné tlaky, bezpečnosť, spoľahlivosť, životnosť ventilov, potrubí a ďalších zariadení, pomocou ktorých je ťažená surovina dopravovaná na zemský povrch a následne spracovávaná.

Vplyvom pôsobenia vysokého tlaku a veľkej nekontrolovanej rýchlosti prúdiacej tekutiny môže dochádzať ku vzniku erózií, kavitácií, tvorbe nadmerného hluku a vibráciám vo ventile resp. na potrubí ako je znázornené na obr 3.1. [7,8]

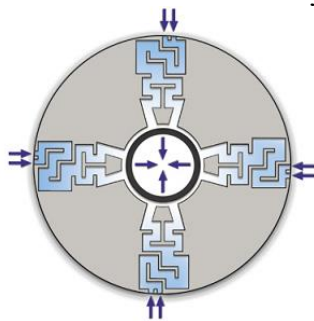


Obr. 3.1: Následky pôsobenia vysokého tlaku a nekontrolovanej rýchlosti prúdenia tekutiny [7,8]

Problémy, ktoré spôsobuje rýchlosť prúdiacej tekutiny je v súčasnosti riešená pomocou atmosférických rezistorov. Spoločnosť IMI CCI vyvinula technológiu *DRAG®* ventilov, ktoré sú schopné eliminovať negatívne účinky prúdiaceho média na ventil.

#### 3.2 DRAG® technológia

Vo ventile, prúdiaca tekutina dosahuje najvyššej rýchlosti v miestach, kde dochádza k rapidnému poklesu tlaku, čo môže spôsobiť poškodenie vnútorných častí ventilu a tým pádom ohroziť bezpečnosť a prevádzku celého zariadenia. V 70. rokoch minulého storočia spoločnosť CCI vydala patent na technológiu, ktorá je schopná metódou postupného znižovania tlaku kontrolovať rýchlosť prúdenia tekutiny vo ventile. Táto technológia nesie názov *DRAG® disk stacks* alebo tiež atmosférické rezistory.



Obr. 3.2: Zobrazenie kovového disku atmosférického rezistoru  
Prevzaté z: <http://www.cci-japan.co.jp/products/pdfs/cci/316.pdf>

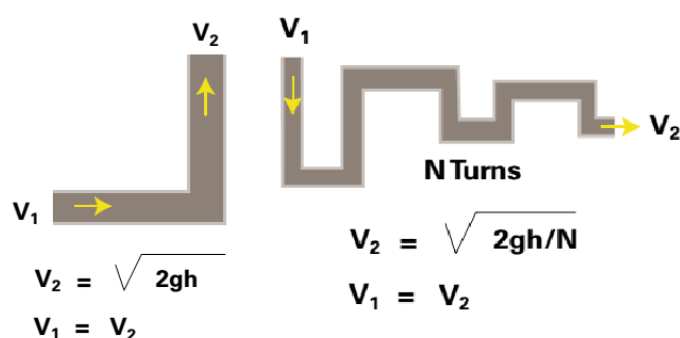
*DRAG*® atmosférický rezistor ,obr. 3.2, je zariadenie pozostávajúce z kovových diskov kruhového prierezu s medzikružím. Na jednotlivých diskoch sa nachádzajú labyrinty cestičiek, ktoré sú na seba kolmé. Navrstvením týchto diskov vznikne atmosférický rezistor, ktorý rozdelí prietok na menšie paralelné prúdy. Každý prúd musí prechádzať labyrintom cestičiek, kde každá zmena smeru toku prúdenia spôsobí pokles tlaku.

Počet zatáčiek  $N$  labyrintu potrebných pre zredukovanie tlaku vychádza zo vzťahu 3.1 [9]

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh}{N}} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3.1)$$

$$v_1 = v_2 \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3.2)$$

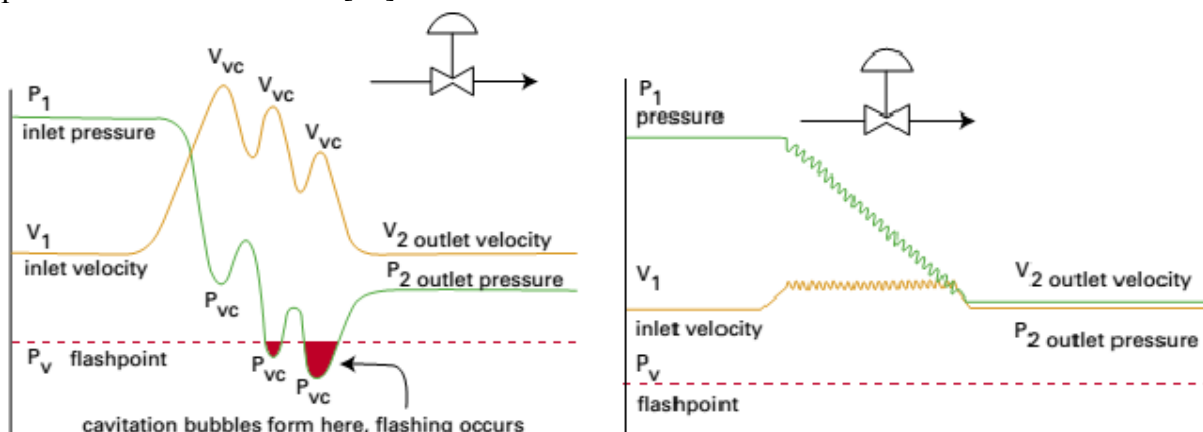
Zo vzťahu 3.2 vyplýva, že použitím atmosférického rezistoru ako zariadenia pre postupné znižovanie tlaku je zachovaná rýchlosť prúdiaceho média pri prechode ventilom.



Obr. 3.3: Jednostupňový a viacstupňový princíp znižovania tlaku [9]

### 3.3 Účinnosť použitia *DRAG*® atmosférického rezistoru

Na obr. 3.4 vľavo je znázornený rozdiel pri použití regulačných ventilov používajúcich štandardný princíp redukcie tlaku pomocou kletky, kde vysoká rýchlosť prúdenia média a nízky počet stupňov redukcie tlaku vytvárajú nedostatočnú ochranu vnútorných častí ventilu pred kavitáciou a eróziou. [10]



Obr. 3.4: Charakteristika redukcie tlaku pomocou kletky (vľavo) a disk-stacku (vpravo) [10]

Obr. 3.4 vpravo ilustruje použitie *DRAG*® atmosférického rezistoru, kde rýchlosť prúdiacej tekutiny je udržiavaná na nízkej hodnote pri prechode rezistorom a vysoký počet stupňov redukcie tlaku zaisťuje kontrolovaný pokles tlaku tekutiny.

Tlak, ktorý sa nachádza na výstupnej strane rezistoru je rozdielny pre kvapaliny a plyny. V tabuľke 2 môžeme vidieť porovnanie účinnosti jednostupňových a viacstupňových atmosférických rezistorov pre plyny ako aj kvapaliny.

$\Delta P$ Bar (psi)	Gas - Velocity Head kPa (psi)		Liquid - Velocity Head meter/sec (ft/sec)	
	6 Stages	1 Stage	6 Stages	1 Stage
400 (5800)	6400 (933)	25200 (3675)	71 (233)	280 (918)
200 (2900)	1600 (233)	21500 (3135)	50 (164)	197 (646)
100 (1450)	700 (102)	10700 (1560)	35 (115)	138 (453)

**Tabuľka 3.1: Porovnanie tlaku na výstupnej strane rezistoru pre plyny a kvapaliny**  
 Prevzaté z <http://www.ccivalve.com/~media/Files/C/CCI/pdf/807-dpc-choke.pdf>

## 4 Návrh usporiadania testovacieho zariadenia

Cieľom tejto kapitoly je navrhnúť usporiadanie zariadenia pre testovanie správnej funkčnosti atmosférických rezistorov s prietokovým koeficientom  $C_v < 10$ , zvoliť vhodné pneumatické prvky a definovať potrebné snímače. Zabezpečiť spoľahlivé a presné meranie, a dodržanie normy EN 60534, a internej procedúry TP-522 spoločnosti IMI CCI.

Jeden z parametrov, ktorý definuje vlastnosti atmosférických rezistorov je prietokový koeficient  $C_v$ . Prietokový koeficient udáva charakteristický prietok danou armatúrou za určitých definovaných podmienok. Bežne sa používajú súčinitele  $C_v$  a  $K_v$ , ktoré sa navzájom líšia použitými jednotkami. Koeficient  $C_v$  sa používa predovšetkým tam, kde nie je zavedená sústava jednotiek *SI*.

### 4.1 Popis usporiadania testovacieho zariadenia podľa EN 60534 a procedúry TP -522

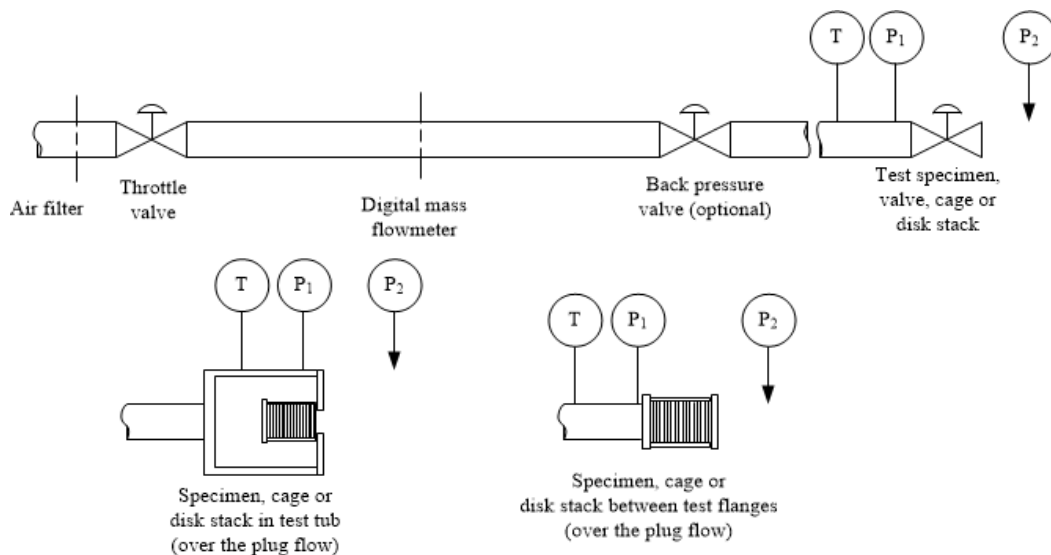
Základný koncept usporiadania testovacieho zariadenia vychádza z internej procedúry TP-522 spoločnosti IMI CCI a normy BS EN 60534. V norme je popísaný a definovaný doporučený postup merania prietokových koeficientov pre stlačiteľne a nestlačiteľne tekutiny, pri použití rôznych typov armatúr.

Vzťah pre výpočet prietokového koeficientu  $C_v$  pre stlačiteľné kvapaliny je podľa [11] daný nasledujúcim vzťahom

$$Y \cdot C_v = \frac{Q}{N_7 \cdot p_1} \cdot \sqrt{\frac{G_s \cdot T}{x}} \quad [-] \quad (4.1)$$

$$x = \frac{p_1 - p_2}{p_1} \quad [\text{bar}] \quad (4.2)$$

Ako môžeme vidieť vzťah 4.1 určuje fyzikálne veličiny, ktoré je nutné merať a vyhodnotiť, a tým pádom aj snímače potrebné k meraniu daných fyzikálnych veličín. Keďže hodnota prietoku  $Q$  sa môže pohybovať v rozsahu od 0 do 1500 slpm, preto procedúra spoločnosti CCI TP-522 navrhuje použitie série prietokomerov s odstupňovaným rozsahom prietoku od 0 do 1500 slpm. Týmto sa zníži chyba, ktorá by bola spôsobená použitím prietokomera s väčším rozsahom pri meraní malých prietokov.

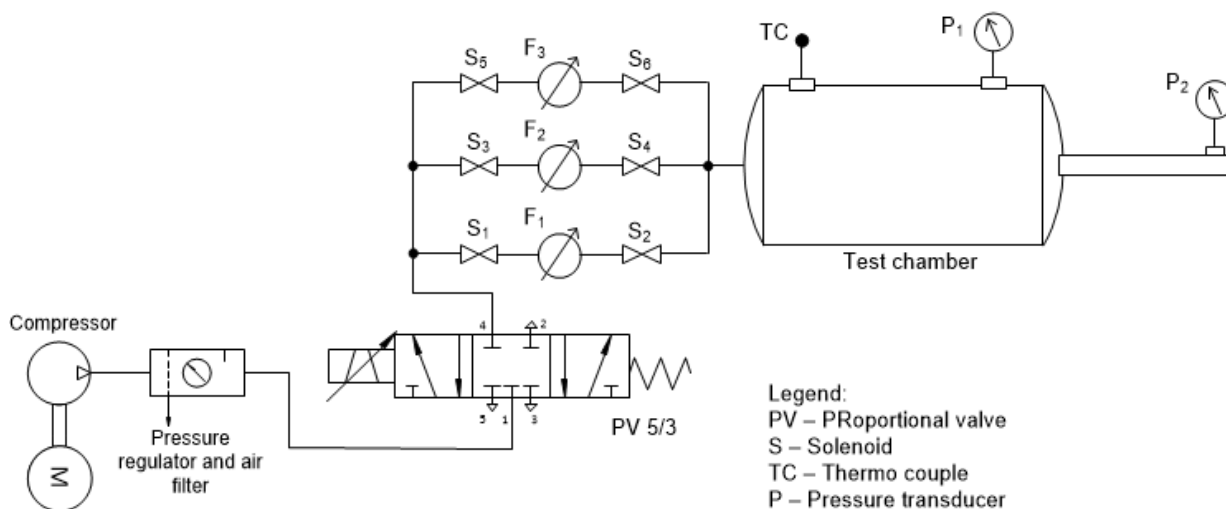


Obr. 4.1: Koncept testovacej zostavy na meranie prietokového koeficientu podľa procedúry CCI TP-522 [12]

Obr. 4.1 zjednodušene znázorňuje testovaciu zostavu popísanú v [12]. Testovaná vzorka, ktorou môže byť ventil, atmosférický rezistor alebo klieťka, je pripojená za prietokomerom s príslušným rozsahom pomocou potrubia. Testovacia komora slúži na testovanie atmosférických rezistorov alebo klieťok pre konfiguráciu kedy médium prúdi v smere z vonkajšieho priemeru na vnútorný priemer testovanej vzorky. Testovacie príruby sú naopak použité pri testovaní funkčnosti atmosférických rezistorov a klieťok v konfigurácii kedy médium prúdi v smere z vnútorného priemeru na vonkajší. Zvyčajne všetky testovacie vzorky majú výstup ústiaci do atmosféry. Škrtiace klapky alebo regulátor tlaku by mali byť použité na vstupnej strane potrubia pred prietokomerom.

## 4.2 Konceptia usporiadania testovacieho zariadenia

Na obr. 4.2 je znázornené usporiadanie pneumatického obvodu testovacieho zariadenia. Kompresorom je vzduch vháňaný do systému cez jednotku na úpravu vzduchu, ktorú tvoria regulačný ventil tlaku a filter vzduchu. Množstvo pretekajúceho média  $Q$  je regulované pomocou proporcionálneho ventilu. Testovaný atmosférický rezistor je umiestnený v testovacej komore, kde na vstupe je meraný tlak  $p_1$  a teplota média  $T$ .



Obr. 4.2: Konceptia testovacieho zariadenia

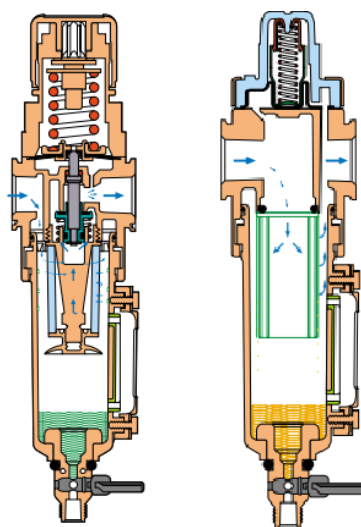
Solneoidové ventily  $S_1$ ,  $S_3$  a  $S_5$  slúžia na usmernenie prietoku do zvolenej meracej linky s prietokomerom s príslušným rozsahom. Solenoidy  $S_2$ ,  $S_4$  a  $S_6$ , ktoré sú umiestnené za prietokomerom, plnia funkciu uzatváracieho ventilu, ktorý zabraňuje pôsobeniu spätného tlaku na prietokomer. Na výstupnej strane testovacej komory je možné umiestniť ukludňovacie potrubie, na ktorého konci je meraný tlak  $p_2$ . V prípade nepoužitia ukludňovacieho potrubia sa meria barometrický tlak.

## 5 Voľba snímačov a pneumatických prvkov

V nasledujúcej kapitole bude riešená voľba snímačov a pneumatických prvkov tak, aby boli splnené funkčné požiadavky z kapitoly 4.1. a 4.2. Poznamenajme, že voľbe prietokomerov a tlakomerov sa podrobnejšie venuje samostatná kapitola 5.6 a 5.7.

### 5.1 Regulátor tlaku vzduchu

Funkcia regulátoru tlaku vzduchu je znižovať vstupný tlak média na tlak výstupný požadovaný tlak a udržiavať ho na danej hodnote. Rozvod tlakového vzduchu v priestore umiestnenia testovacieho zariadenia je približne 10 bar.



Obr. 5.1: Regulátor tlaku vzduchu (vľavo), filter vzduchu (vpravo) [13]

V aplikácií je použitý regulátor s maximálnym výstupným tlakom 16 bar s možnosťou separácie vody a oleja.

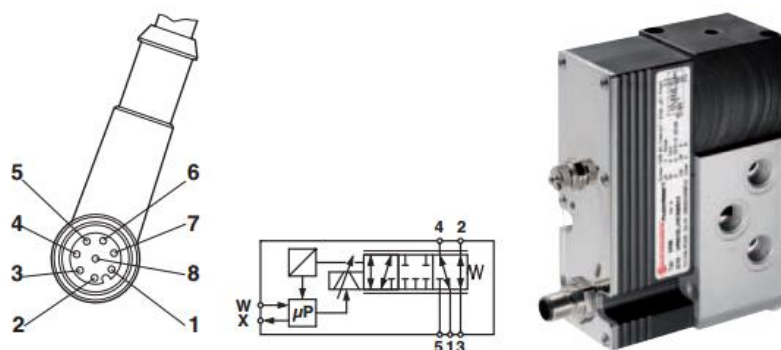
### 5.2 Vzduchový filter

Funkciou vzduchového filtra je zachytiť a odlúčiť nečistoty nachádzajúce sa v rozvodoch stlačeného vzduchu. Vzduch produkovaný kompresorom je zvyčajne horúci, vlhký a špinavý. K zaisteniu dobrej kvality vzduchu je prvým krokom filtrácia nečistôt pomocou vzduchového filtra. Typickými nečistotami nachádzajúcimi sa v rozvodoch stlačeného vzduchu je voda, pevné a olej. [13]

Filter použitý v pneumatickom obvode, znázornený na obr. 5.1 vpravo, má filtračnú vložku 40  $\mu\text{m}$  a manuálny odtok oleja.

### 5.3 Proporcionálny ventil VP – 60

K regulácii prietoku a diferenčného tlaku v pneumatickom obvode slúži 5/3 proporcionálny ventil so vstupným napájacím napätím 24 Vdc (Pin 6) ovládaný prúdom 4 – 20 mA (Pin 1). Maximálny dovolený prietok  $Q$  je 1200  $\text{Nl/min}$  a prevádzkový tlak  $p$  je 16 bar. Prúdový rozsah je rozdelený na ovládanie jednotlivých polôh proporcionálneho ventilu. Na obr. 5.2 je zobrazený typ použitého konektora, pneumatická značka s vyznačenými cestami a samotný proporcionálny ventil.

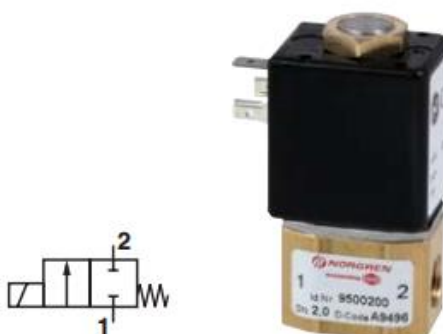


Obr. 5.2: Konektor proporcionálneho ventilu VP-60, pneumatická značka a zobrazenie samotného ventilu [14]

Prvej polohe odpovedá ovládací prúd 4 mA, strednej polohe, kde všetky porty sú uzatvorené je ovládací prúd 12 mA a v tretej polohe je prúd 20 mA. Postupným zvyšovaním veľkosti prúdu sa ventil lineárne otvára, čím sa zvyšuje prietok. [14]

## 5.4 Uzatvárací elektromagnetický sedlový ventil

Pneumatický obvod je tvorený tromi linkami, kde je kladená požiadavka na rýchlosť prepínania medzi nimi. Uzatvárací ventil musí tiež spĺňať podmienku minimálneho prietoku 1500 l/min. Z vyššie uvedených požiadaviek bol zvolený 2/2 elektromagnetický sedlový ventil priamo ovládaný digitálnym signálom 24 Vdc. V základnej polohe je ventil uzavretý. [15]



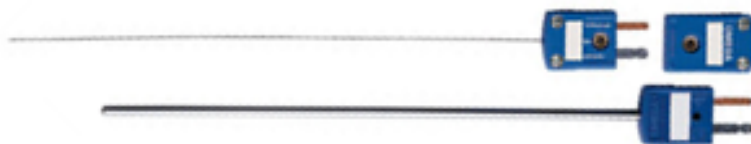
Obr. 5.3: Zobrazenie a pneumatická značka elektromagnetického sedlového ventilu [15]

Hlavnou časťou ventilu je solenoid, čo je valcová cievka s husto navinutými závitmi po celej dĺžke. Vo vnútri cievky je umiestnené jadro, ktoré je vťahované pôsobením elektromagnetickej sily, ak cievkou prechádza elektrický prúd.

## 5.5 Termočlánok

Na meranie teploty prúdiaceho média vo vnútri testovacej komory je použitý termočlánok OMEGA typu T. Čidlo senzora sa skladá z dvoch vodičov s rôznymi materiálmi, ktoré sú na jednom konci spojené. V prípade uzatvorenia elektrického obvodu rozdiel teplôt spôsobí tok elektrónov. Preto je potrebné pripojiť meraciu sondu snímača k terminálu termočlánku a následne priviesť signál do meracieho zariadenia.





Obr. 5.4: Termočlánok OMEGA typu T [16]

Materiály vodičov termočlánku sú meď a konštantan. Vodiče sú umiestnené v puzdre vyrobenom z inkonelu, ktorý poskytuje ochranu pred nežiaducimi vplyvmi okolitého prostredia. Je dôležité nezabudnúť použiť pripojovacie vodiče rovnakého materiálu ako sú vodiče konkrétneho termočlánku. [16]

## 5.6 Meranie prietoku plynov

Na základe rozsiahlosti akou je meranie prietoku sa postupom času vyvinula široká škála prístrojov a zariadení, využívajúcich rozličné fyzikálne princípy. Pri voľbe správneho prietokomeru treba dbať aj na jeho funkčný princíp.

Pre našu aplikáciu nie je možné použiť prietokomery využívajúce napr. Coriolisovho princípu resp. vírové prietokomery, ktoré sú určené na meranie prietoku rádovo vyššieho ako je nami definovaných 1500 slpm. Tiež ich robustná konštrukcia vyžaduje uchytenie do potrubia pomocou prírub a minimálny prietok potrubím je potrebný k správnej funkcii týchto prietokomerov. Z tohto dôvodu sa obmedzíme na prietokomery založené na princípe výmeny tepla medzi zdrojom energie a okolím tzv. tepelné hmotnostné prietokomery.

Cieľom tejto kapitoly je preto popis fungovania tepelných hmotnostných prietokomerov, definovanie požiadavkou na prietokomery pneumatického obvodu, porovnanie a výber vhodného prietokomeru pre našu aplikáciu.

### 5.6.1 Tepelné hmotnostné prietokomery

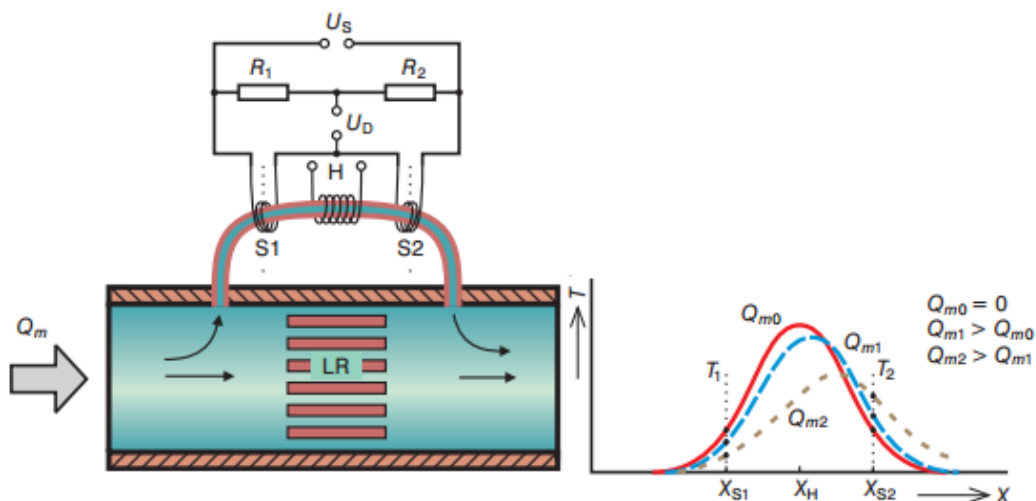
Podľa [17] sa tepelné hmotnostné prietokomery sa realizujú v dvoch základných konfiguráciách a to na:

- Kalorimetrické hmotnostné prietokomery
- Hmotnostné termoanemometry

V nasledujúcich dvoch podkapitolách popíšeme ich princíp fungovania.

#### 5.6.1.1 Kalorimetrické hmotnostné prietokomery

Kalorimetrické hmotnostné prietokomery pracujú na princípe vyhodnocovania miery oteplenia, ktorá je spôsobená prúdením hmoty. Meracia časť senzora je umiestnená na tenkostennej ( $\sim 1\text{ mm}$ ), dobre tepelne vodivej kapiláre. V strede kapiláry je umiestnené zdroj tepla  $H$  a na oboch stranách sú symetricky umiestnené čidla teploty  $S_1$  a  $S_2$ , obr. 5.5. [17]



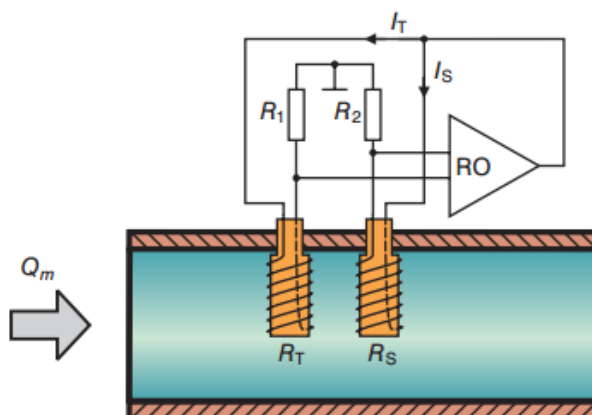
Obr. 5.5: Kalorimetrický hmotnostný prietokomer [17]

$$(T_2 - T_1) = A \cdot c_p \cdot P \cdot Q_m \quad (5.1)$$

Výstupný signál z teplotných čidiel je vyhodnocovaný napr. Wheatsonovým mostíkom. V prípade nulového prietoku kapilárou sa teplota šíri rovnomerne na obe strany a teploty  $T_1$  a  $T_2$  budú rovnaké. Prúdením tekutiny cez snímač a teda aj kapilárou sa symetrické rozloženie teploty poruší a Wheatsonov mostík vyhodnotí rozdiel teplôt  $T_2 - T_1$ . [17, 18]

### 5.6.1.2 Hmotnostný termoanemometer

Hmotnostný termoanemometer je druh hmotnostného prietokomeru, ktorý využíva elektrický vyhrievané odporové články. Tieto články sú vložené priamo do potrubia a vyhodnocuje sa chladiaci účinok spôsobený prúdením tekutiny. Množstvo odobratého tepla je závislé na rýchlosti prúdenia, teplotnej vodivosti, hustoty a teploty tekutiny. Podobne ako u kalorimetrov je tak isto výstupný signál vyhodnocovaný Wheatsonovým mostíkom. [17]



Obr. 5.6: Hmotnostný termoanemometer [11]

Odpor článku  $R_s$  je z pravidla menší, tým pádom nim preteká väčší elektrický prúd, ktorý ho ohrieva. Teplota článku  $R_T$  má rovnakú teplotu ako daná tekutina. Pri nenulovom prietoku sa teplo z článku  $R_s$  odvádza prúdením tekutiny. V tomto prípade je článok vyhrievaný konštantným elektrickým prúdom a vyhodnocujeme zmenu teploty článku v závislosti na prietoku. [17]

Ďalší typ termoanemometru je vybavený regulačným obvodom, ktorý reguluje veľkosť elektrického prúdu tak, aby teplota odporového článku mala konštantnú hodnotu pri zmene prietoku. Vyhodnocuje sa zmena elektrického prúdu na prietoku. Elektrický prúd je potom úmerný hmotnostnému prietoku. [17]

$I = a + b\sqrt{Q_m}$	[A]	(5.2)
-----------------------	-----	-------

Závislosť medzi elektrickým prúdom  $I$  a hmotnostným prietokom  $Q_m$  je daná vzťahom 5.2. podľa [17].

### 5.6.2 Požiadavky na prietokomery pneumatického obvodu

Základnou požiadavkou na prietokomery je vhodný analogický výstup signálu – prúdový alebo napäťový a napájacie napätie 24 Vdc. Podľa predbežných meraní maximálny možný prietok, ktorý sme schopný vytvoriť z rozvodu stlačeného vzduchu s tlakom 10 bar je 1300 slpm. Preto maximálny rozsah prietokomeru je 0 – 1500 slpm. Ďalšia požiadavka je kladená na voľbu jednotiek prietoku a nastavenie druhu prúdiaceho média. Telo prietokomeru by malo byť čo najmenšie, aby sa zmestilo do pripravovanej skrine, v ktorej je umiestnený celý pneumatický obvod.

### 5.6.3 SmartTrak® Series 100

Prietokomer SmartTrak® Series 100 od spoločnosti Sierra Instruments je tepelný hmotnostný prietokomer s analógovým prúdovým výstupom 4 – 20 mA. Maximálny rozsah tejto série prietokomerov je 0 – 1000 slpm a presnosť v celom rozsahu merania je  $\pm 1\%$ . Samotný prietokomer obsahuje displej so širokou škálou nastavení od jednotiek, meraných plynov, zobrazenia tlaku, teploty. K svojej činnosti potrebuje jednosmerný zdroj napätia 24 Vdc. Komunikácia s prietokomerom prebieha buď pomocou sériovej linky RS-232 alebo cez RJ-45. [19]



Obr. 5.7: Prietokomer SmartTrak® Series 100  
Prevzaté z: <http://www.sierrainstruments.com/products/c100.html>

Zhrnutie parametrov prietokomeru SmarTrak® Series 100.

Rozsah meranej veličiny	0 – 1000 slpm	✗
Analógový výstup	4-20 mA / 0 – 5 Vdc	✓
Presnosť merania	± 1%	✓
Voľba jednotiek	Možnosť vytvárania vlastných jednotiek	✓
Voľba druhu média	10 predprogramovaných plynov	✓
Komunikácia	RS – 232 / RJ – 45	✓
Napájacie napätie	24 Vdc	✓

Tabuľka 5.1: Zhrnutie parametrov prietokomeru SmarTrak® Series 100

## 5.6.4 OMEGA FMA – 1600 A

Prietokomer OMEGA FMA – 1600 A je objemový prietokomer s maximálnym rozsahom 0 – 1500 slpm. Vyhodnocuje sa objemový prietok, ktorý je závislý na diferenčnom tlaku pozdĺž úseku laminárneho elementu. Vnútorňa konštrukcia prietokomera je znázornená na obr. 5.8.



Obr. 5.8: Prietokomer OMEGA FMA – 1600 a jeho vnútorná štruktúra [20]

Prúdiaca tekutina je usmerňovaná pomocou elementov, ktoré zabezpečujú laminárne prúdenie média. Diferenčný tlakomer meria pokles tlaku  $\Delta P$  na tomto úseku. Pomocou Poiseuilleho vzťahu a znalosti hodnoty dynamickej viskozity daného plynu sa určí objemový prietok  $Q_V$ . Absolútny tlakomer a senzor teploty sa používajú k prepočtu normovaných jednotiek na jednotky štandardné. K napájaniu je nutný zdroj napätia 15 – 30 Vdc. Prietokomer má prúdový výstup 4 – 20 mA. Výrobca udáva presnosť merania  $\pm 1\%$  z meraného rozsahu. Prietokomer má štandardný konektor RS – 232. Možnosť voľby medzi štandardnými resp. normovanými jednotkami.[20]

Rozsah meranej veličiny	0 – 1500 slpm	✓
Analógový výstup	4-20 mA / 0 – 5 Vdc	✓
Presnosť merania	± 1%	✓
Voľba jednotiek	Štandardné / normované	✓
Voľba druhu média	21 predprogramovaných plynov, možnosť kombinovať	✓
Komunikácia	RS – 232	✓
Napájacie napätie	15 – 30 Vdc	✓

Tabuľka 5.2: Zhrnutie parametrov prietokomeru OMEGA FMA-1600 A

### 5.6.5 Bronkhorst EL-FLOW® Series

Prietokomer EL-FLOW® Series od spoločnosti Bronkhorst pracuje na rovnakom princípe merania prietoku ako prietokomer SmartTrak® Series 100 z kap. 5.6.1. Prietokomer Bronkhorst sa vyznačuje nadštandardným meracím rozsahom 0 – 1670 l/min s presnosťou ± 1% čo je pre laboratórne účely veľmi dostačujúce. Tlaková odolnosť prietokomeru je až do 400 barov. Vstupné napájacie napätie potrebné k činnosti je 15 – 24Vdc. Výstup prietokomeru je analógový signál prúdový resp. napäťový podľa konfigurácie. Konektor RS – 232 umožňuje komunikáciu, napájanie a zber dát z prietokomeru. V našom prípade za nevýhodu môžeme považovať cenu, ktorá výrazne prevyšuje hodnotu prietokomerov z predošlých kapitol. [21]



Obr. 5.9 : Bronkhorst EL-FLOW® Series

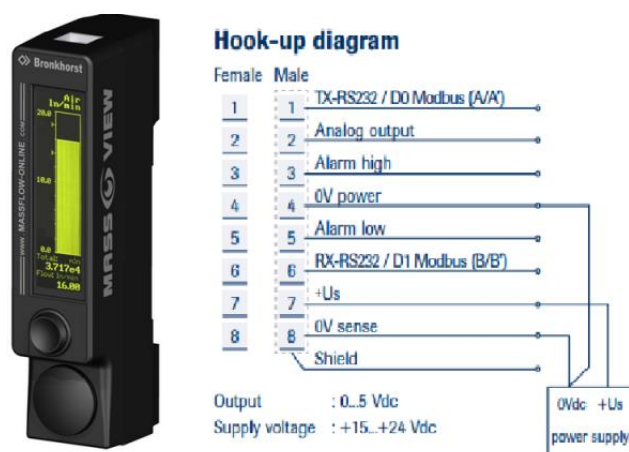
Prevzaté z : [http://www.bronkhorst.com/en/products/gas\\_flow\\_meters\\_and\\_controllers/high\\_pressure/](http://www.bronkhorst.com/en/products/gas_flow_meters_and_controllers/high_pressure/)

Rozsah meranej veličiny	0 – 1650 slpm	✓
Analógový výstup	4-20 mA / 0 – 5 Vdc	✓
Presnosť merania	± 1%	✓
Voľba jednotiek	Štandardné / normované	✓
Voľba druhu média	21 predprogramovaných plynov, možnosť kombinovať	✓
Komunikácia	RS – 232	✓
Napájacie napätie	15 – 24 Vdc	✓

Tabuľka 5.3: Zhrnutie parametrov prietokomeru Bronkhorst EL-FLOW® Series

### 5.6.6 Bronkhorst MASS-VIEW Series

Hmotnostný prietokomer Bronkhorst MASS-VIEW pracuje rovnako ako predošlé uvedené snímače na základe merania miery oteplenia medzi zdrojom energie a okolím pri tepelnej výmene. Výhodou použitia tohto prietokomeru je, že hmotnostný prietok sa meria priamo a odpadá tak potreba použitia ďalších senzorov.



Obr. 5.10: Prietokomer Bronkhorst MASS-VIEW a použité piny potrebné k zberu dát. [22]

Maximálny rozsah prietokomeru je 0 – 200 slpm, čomu odpovedá analógový výstup snímača 0 – 5 V s presnosťou  $\pm 2\%$  z celého rozsahu. Potrebný napájací signál je 15 – 24 Vdc. Prietokomer Bronkhorst využíva ku komunikácii a prenosu dát konektor RJ-45. Široká možnosť nastavenia umožňuje voľbu zobrazovania aktuálnej hodnoty prietoku – graf, numerická hodnota, jednotky – štandardné, normované, typ použitého média a celkové množstvo pretečenej tekutiny. [22]

Rozsah meranej veličiny	0 – 200 slpm	✗
Analógový výstup	4-20 mA / 0 – 5 Vdc	✓
Presnosť merania	$\pm 1\%$	✓
Voľba jednotiek	Štandardné / normované	✓
Voľba druhu média	21 predprogramovaných plynov, možnosť kombinovať	✓
Komunikácia	RS – 232	✓
Napájacie napätie	15 – 24 Vdc	✓

Tabuľka 5.4: Zhrnutie parametrov prietokomeru Bronkhorst MASS-VIEW

### 5.6.7 Výber prietokomeru

Porovnaním vyššie uvedených prietokomerov je možné vidieť, že sa navzájom líšia iba v minimálnych detailoch a funkciách, ktoré ponúkajú. Dôležitý faktor vo výbere prietokomeru zohráva aj jeho cena. U prietokomerov s väčším rozsahom sa cena pohybuje v hodnotách 80 000 Czk za kus.

Prietokomer SmartTrack® Series 100 splňuje všetky definované požiadavky až na maximálny merací rozsah. Ďalší prietokomer Bronkhorst EL-FLOW® by bol pre našu aplikáciu ideálny, avšak, prietokomer disponuje funkciami, ktoré výrazne zvyšujú jeho cenu, a ktoré by sme plne nevyužili. Na základe skúsenosti s prietokomeri OMEGA v testovacom laboratóriu v IMI CCI Czech Republic sme zvolili na meranie prietoku v rozsahu 0 – 500 slpm a 0 – 1500 slpm prietokomery zo série FMA-1600 A, ktoré splňujú nami definované požiadavky. Na meranie prietoku v rozsahu 0 – 200 slpm sme použili prietokomer Bronkhorst MASS-VIEW.

## 5.7 Meranie tlaku plynov

Merania tlaku patrí podobne ako meranie tekutín do oblasti meracej techniky, ktorá sa využíva vo všetkých odvetviach priemyslu. Tlakové meradlá využívajú k meraniu tlaku rôzne fyzikálne princípy, ktoré sa navzájom líšia podľa charakteru prevodu meraného tlaku na výstupný signál. Snímače tlaku sa delia podľa do viacerých skupín. Podľa [23] ich môžeme rozdeliť na základe funkčného princípu nasledovne:

- Silové tlakomery
- Hydrostatické tlakomery
- Deformačné tlakomery
- Snímače tlaku s elektrickým výstupom

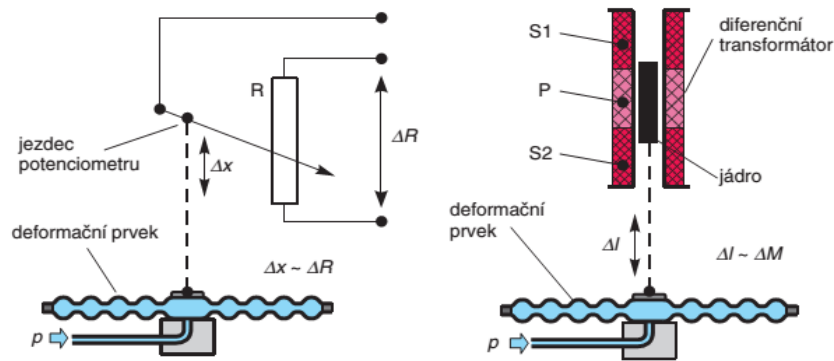
Z rozdelenia tlakomer môžeme konštatovať, že použitie silových a hydrostatických tlakomerov v našej aplikácii nemá zmysel. Deformačné tlakomery sú použiteľné ale aby sme mohli zaznamenávať hodnoty tlaku v čase pomocou meracieho hardware požadujeme elektrický výstup snímača.

### 5.7.1 Snímače tlaku s elektrickým výstupom

V nasledujúcej kapitole popíšeme princípy fungovania základných snímačov tlaku s elektrickým výstupom. Snímače tlaku s elektrickým výstupom sú vhodné na merania tlaku kvapalín ako aj plynov. U prúdiacich kvapalín a plynov je treba mať na pamäti, že okrem statického tlaku tu vystupuje aj tlak dynamický, ktorý zahŕňa stlačiteľnosť prúdiaceho média.

#### 5.7.1.1 Tlakomery s potenciometrickým a indukčnosťným senzorom polohy

Princíp fungovania tlakomeru s potenciometrickým senzorom polohy je ilustrovaný na obr. 5.11. Deformačný prvok tlakomera je mechanicky spojený s jazdcom potenciometra. Deformácia  $\Delta x$  je prenášaná cez mechanický prvok, ktorý vyvolá zmenu polohy jazdca potenciometra a to sa prejaví ako zmena odporu  $\Delta R$ . Zmena odporu je úmerná deformácií deformačného prvku. [24]



Obr. 5.11: Tlakomer s potenciometrickým senzorom polohy (vľavo).  
Tlakomer s indukčnosťným senzorom polohy (vpravo) [24]

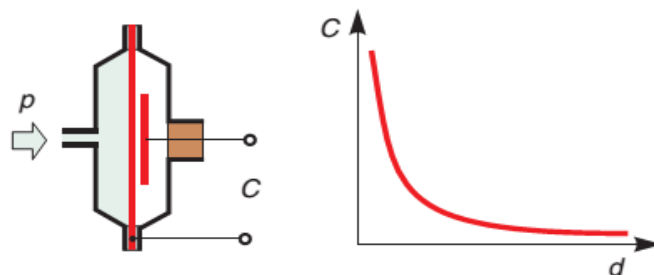
V prípade varianty s indukčnosťným senzorom sa namiesto potenciometra využíva napr. lineárneho diferenčného transformátora. Pôsobiaci tlak spôsobí zmenu polohy jadra diferenčného transformátora, ktorý je spojený s deformačným prvkom. Zmena polohy jadra vyvolá zmenu vzájomnej indukčnosti  $\Delta M$  medzi vinutiami transformátora. Primárne vinutie  $P$  je napájané striedavým napätím a zmena napätia na sekundárnych vinutiach  $S_1$  a  $S_2$  je priamo úmerná zmene polohy jadra  $\Delta l$ . [24]

### 5.7.1.2 Kapacitné snímače tlaku

Hlavnou časťou kapacitných snímačov sú dve elektródy, kde jedna z nich je tvorená membránou. Poloha membrány snímača sa vplyvom tlaku tekutiny mení, čo vyvolá zmenu kapacity medzi elektródami. Platí vzťah pre kapacitu  $C$ .

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad [F] \quad (5.3)$$

Závislosť medzi vzdialenosťou a kapacitou je nelineárna s hyperbolickou priebehom, obr 5.12. Z toho vyplýva, že kapacita má najväčšiu hodnotu pri malých vzdialenostiach. Preto býva elektronika kapacitného snímača vybavená linearizačným členom. [24]



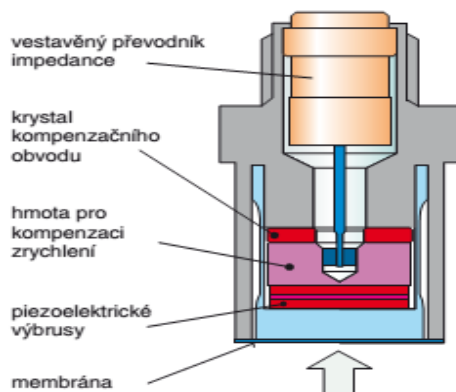
Obr. 5.12: Schéma kapacitného snímača tlaku a závislosť kapacity na polohe elektród [24]

Kapacitný princíp fungovania snímačov tlaku sa často využíva pri meraní rozdielových tlakov. Kapacitné diferenčné snímače tlaku sú vybavené dvoma elektródami, medzi ktorými je umiestnená membrána. Tlak tekutiny pôsobí na oddeľovaciu membránu, ktorá následne vyvolá deformáciu stredovej membrány. Zmena kapacity je pomocou elektroniky prevedená na zmenu napätia, ktorá je úmerná pôsobiacemu tlaku. [24]



### 5.7.1.3 Piezoelektrické snímače tlaku

Piezoelektrické snímače tlaku fungujú na princípe piezoelektrického javu. Na kryštál pôsobí tlak tekutiny vyvolávajúci mechanické deformácie, vplyvom ktorých dochádza ku generovaniu elektrického náboja  $Q$ . Piezoelektrický jav funguje aj obrátene. V prípade priloženia striedavého elektrického poľa dochádza k mechanickému rozkmitaniu kryštálu. [17]



Obr. 5.13: Piezoelektrický snímač tlaku [17]

Piezoelektrický snímač tlaku je tvorený dvoma piezoelektrickými kryštálmi, ktoré sú zapojené elektricky paralelne, čím sa výsledný elektrický náboj sčíta. Piezoelektrické doštičky bývajú oddelené od tekutiny pomocou oddeľovacej membrány, ktorá prenáša tlakovú silu. Ku kompenzácií zrýchlenia sa využíva prídavnej hmotnosti a piezoelektrického kryštálu s opačnou polarizáciou. Výhodou snímača sú malé rozmery, vysoký rozsah meraných hodnôt, rýchla odozva. Naopak nie sú vhodné pre meranie statických tlakov. [17]

### 5.7.2 Požiadavky na snímače tlaku

Za predpokladu, že v testovacom zariadení bude pomer diferenčného tlaku  $x$  dosahovať maximálnu hodnotu 1 bar, musí merací rozsah tlakomeru byť minimálne v rozpätí 0 – 2 barA. Jednotka barA znamená, že snímač tlaku meria atmosférický tlak, ku ktorému pričíta hodnotu pretlaku. Ďalšia požiadavka je analógový elektrický výstup – prúdový alebo napäťový, presnosť v celom rozsahu merania  $\pm 1\%$  a vstupné napájacie napätie 24 Vdc

### 5.7.3 Snímač tlaku OMEGA DPGM409

Jedná sa o manometer, ktorý sa dodáva vo viacerých prevedeniach a konfiguráciách, v ktorých si užívateľ môže vybrať požadovaný elektrický výstup – prúdový 4 – 20 mA, napäťový 0 – 5 Vdc resp 0 – 10 Vdc. Je potrebný zdroj napájacieho napätia 24 Vdc v prípade voľby analógového výstupu, inak je snímač napájaný z batérie s dlhou životnosťou. Podľa potreby užívateľa je možnosť špecifikácie meracieho rozsahu od 0 – 350 bar a druhu meraného tlaku napr. absolútny, relatívny. Presnosť snímača je  $\pm 0,08\%$ . [25]



Obr. 5.14: Snímač tlaku OMEGA DPGM409  
Prevzaté z : <http://www.omega.com/pptst/DPGM409.html>

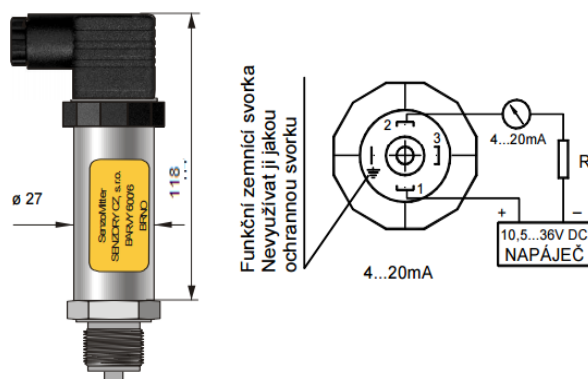
Snímač pracuje na princípe piezoelektrického javu, ktorý je bližšie popísaný v kapitole 5.7.1.3. Parametre snímača vzhľadom k stanoveným požiadavkám sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Rozsah meranej veličiny	0 – 2 barA	✓
Analógový výstup	4-20 mA / 0 – 5 Vdc / 0 – 10 Vdc	✓
Presnosť merania	± 0,08%	✓
Napájacie napätie	24 Vdc	✓
Prenos signálu	vodičom / bezdrôtovo	✓
Cena	+700 \$	✗

Tabuľka 5.5: Zhrnutie parametrov snímača tlaku OMEGA DPGM409

#### 5.7.4 Snímač tlaku SenzoMitter AS

Snímač SenzoMitter AS je prevodník tlaku s rozsahom 0 – 2 barA čomu odpovedá prúdový výstup tlakomeru 4 – 20 mA s presnosťou  $\pm 0,4\%$  z daného rozsahu. Maximálny povolený statický tlak je 4x z rozsahu snímača. Tlakomer vyžaduje zdroj napätia 15 – 36 Vdc. [26]



Obr. 5.15: Absolútny tlakomer SenzoMitter AS a jeho zapojenie [26]

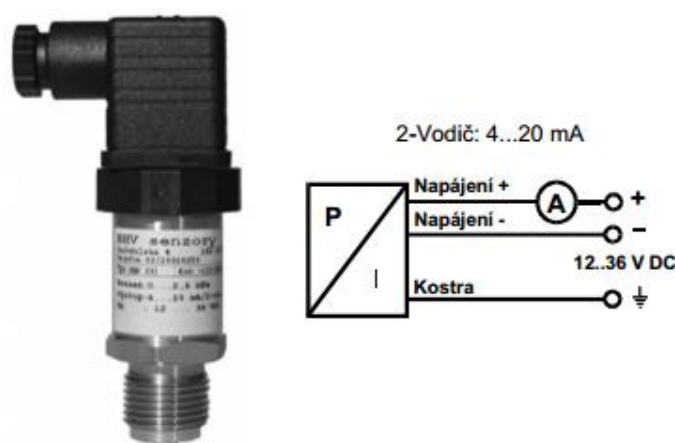
K meraniu tlaku sa využíva piezo kremíkového odporového čidla, ktoré je oddelené od merného média oddeľovacou membránou a kvapalinou. Výhodou snímača je možnosť priamej montáže na príslušné odberové miesto tlaku.

Rozsah meranej veličiny	0 – 2 barA	✓
Analógový výstup	4-20 mA	✓
Presnosť merania	± 0,4%	✓
Napájacie napätie	24 Vdc	✓
Prenos signálu	2 – vodičové zapojenie	✓
Cena	8 000 Czk	✓

Tabuľka 5.6: Zhrnutie parametrov snímača SenzoMitter AS

### 5.7.5 Snímač tlaku BHV DMP 331

Snímač tlaku DMP 331 prevádza podľa konfigurácie tlak plynu na analógový elektrický signál prúdový v rozsahu 0 – 20 mA resp. 4 – 20 mA alebo napäťový signál 0 – 5 Vdc. Vyrába sa v zhotovení pre meranie absolútneho alebo relatívneho tlaku v rozsahu od 0,25 – 600 bar. Presnosť snímača je ± 0,5%. Podľa výrobcu je vhodný na meranie statického ako aj dynamického tlaku.



Obr. 5.16: Snímač tlaku BHV DMP 331

Prevzaté z: <http://www.bhvsenzory.cz/data/products/file/dmp331.pdf>

Čidlo tlaku snímača, ktorým je piezoelektrický kryštál, sa nachádza v puzdre z nerezovej oceli, v ktorom je navarená oddelovacia membrána a náplň s interným olejom. Tlak sa prenáša cez membránu a inertný olej na čidlo tlaku, ktorý generuje výstupný elektrický signál. Tento signál je ďalej spracovaný elektronikou snímača. [27]

Zhrnutie parametrov snímača na základe definovaných požiadaviek je v nasledujúcej tabuľke.

Rozsah meranej veličiny	0 – 2 barA	✓
Analógový výstup	4-20 mA	✓
Presnosť merania	± 0,5%	✓
Napájacie napätie	24 Vdc	✓
Prenos signálu	2 – vodičové zapojenie	✓
Cena	15 000 Czk	✓

### 5.7.6 Výber prietokomeru

Na základe porovnania parametrov jednotlivých snímačov je vidieť, že všetky splňujú stanovené požiadavky. Snímač tlaku OMEGA DPGM409 má z pomedzi uvedených tlakomerov najlepšie hodnoty presnosti, takisto disponuje displejom s možnosťou základného nastavenia. Avšak jeho cena ďaleko prevyšuje stanovený rozpočet.

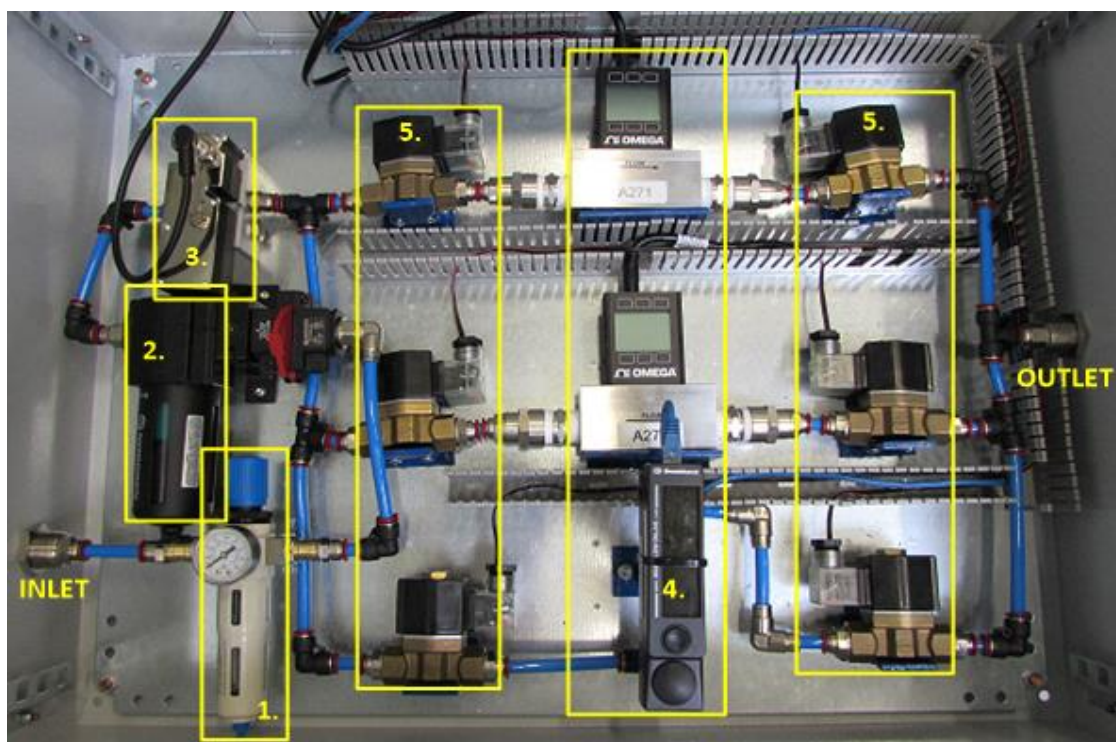
Tlakomer SenzoMitter AS a BHV DMP 331 sú prakticky rovnaké čo sa týka konštrukcie, výstupného signálu, zapojenia a meracieho rozsahu. Pre našu aplikáciu sme nakoniec zvolili prevodník tlaku SenzoMitter AS.

## 5.8 Kalibrácia snímačov

Kalibrácia jednotlivých prietokomerov a tlakomerov pneumatického obvodu je zabezpečovaná špecializovaným pracoviskom pre kalibráciu a certifikáciu meracích zariadení. Podľa potreby sa kalibračný list vystavuje na dobu 3 resp. 12 mesiacov.

## 5.9 Realizácia pneumatického obvodu

Pneumatický obvod testovacieho zariadenia, ktorý sme definovali a jednotlivé časti popísali v kapitole 4.1 a 4.2 bol zostavený podľa daných požiadaviek a jeho realizáciu je možné vidieť na obr. 5.17.



Obr. 5.17: Finálna realizácia pneumatického obvodu

Aby bola zabezpečená neprístupnosť do pneumatického obvodu nepovolaným osobám a súčasne sa zachovala mobilita testovacieho zariadenia ako celku, bol pneumatický obvod umiestnený do rozvodnej skrine o rozmeroch 800x600x300 mm, čo umožnilo prichytenie skrine na podstavec z hliníkových profilov mechanickej časti testeru pomocou trojuholníkových spojok, matíc a skrutiek.

Menšia komplikácia nastala pri prechode závitú prietokomeru OMEGA FMA - 1600A z  $\frac{3}{4}$  NPT na G  $\frac{1}{2}$ , kde sa mi nepodarilo zabezpečiť priamy prechod medzi jednotlivými závitmi. Tým pádom došlo k nárastu potrebného miesta pre použitie kombinovanej priechodky a redukcii miesta ostatných prvkov pneumatického obvodu.

Stlačený vzduch vstupuje do obvodu cez guľový kohút, ktorý je umiestnený z vonkajšej strany rozvodnej skrine. Regulátor tlaku vzduchu upraví tlak tak, aby na výstupe bola požadovaná hodnota. Vzduch ďalej prúdi cez vzduchový filter, kde sa zbaví nečistôt, následne do proporcionálneho ventilu a jednotlivých liniek pneumatického obvodu. Výstup obvodu je spojený s mechanickou časťou testeru pomocou vzduchovej hadičky, ktorá ústi do rýchlo spojky so závitom G  $\frac{1}{2}$ .

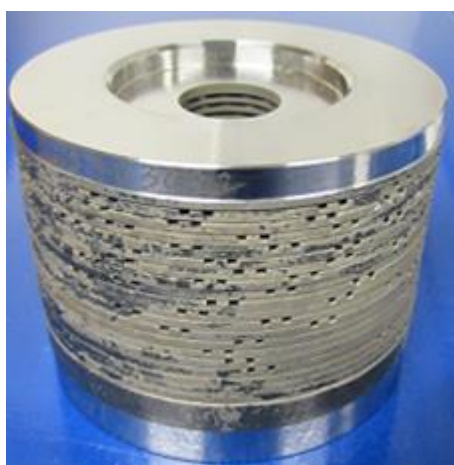
Po prvotnom otestovaní pneumatického obvodu bolo zistené, že nie je možné dosiahnuť prietok väčší ako 850 *SLPM*. Je to spôsobené väčším počtom zatáčiek v obvode, ako aj použitím rýchlo spojok, ktoré fungujú ako rezistory. Návrhom na odstránenie tohto problému je náhrada hadičiek a rýchlo spojok kovovými trúbkami s prevlečnými maticami. Riešením by sa malo dospieť k minimálnym tlakovým stratám a poklesom prietoku v pneumatickom obvode.

## 6 Návrh mechanickej časti testovacieho zariadenia

Cieľom v nasledujúcej kapitole bude návrh mechanických častí testovacieho zariadenia tak, aby bol daný návrh výrobitelný, bezpečný a pre obsluhu užívateľsky prijateľný. Návrh rozmerov a jednotlivých častí testovacieho zariadenia prebiehal v spolupráci s konštrukčným oddelením zaoberajúcim sa vývojom nových produktov sídlacim vo Viedni.

### 6.1 Testované atmosférické rezistory

Testované vzorky atmosférických rezistorov, pre ktoré má byť testovacie zariadenie navrhnuté, majú maximálny vonkajší priemer disku  $d = 121$  mm, maximálny vnútorný priemer rezistoru  $d_1 = 38$  mm a výšku  $h = 110$  mm a teoreticky vypočítaný prietokový koeficient  $C_V < 10$ .



Obr. 6.1: Testovacia vzorka atmosférického rezistoru

V tabuľke 6.1 sú uvedené ďalšie konfigurácie atmosférických rezistorov, pre ktoré je testovacie zariadenie navrhované.

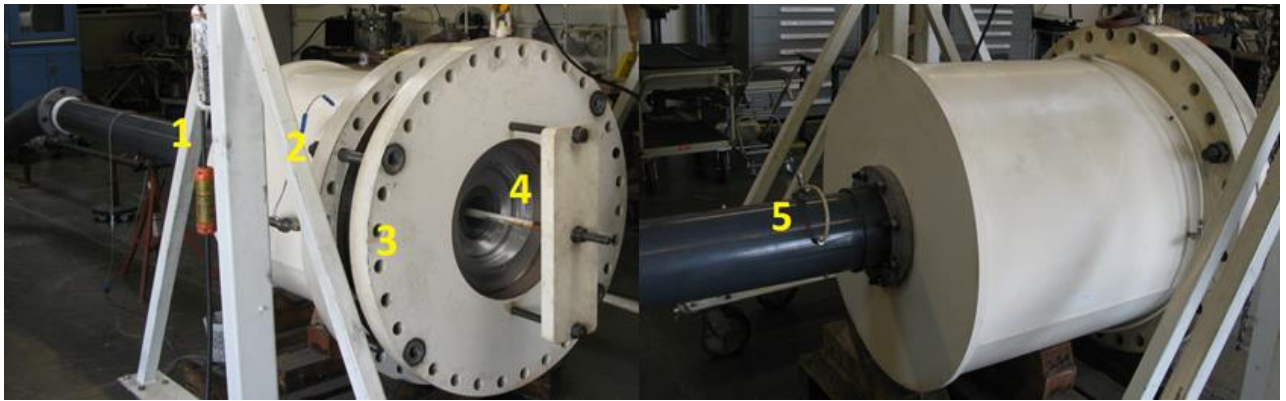
Vnútorný priemer [mm]	Vonkajší priemer [mm]	Výška [mm]
10.0	66.5	66.0
16.0	66.0	66.0
25.0	66.5	66.5
38.0	98.5	92.0

Tabuľka 6.1: Rozmery atmosférických rezistorov, ktoré možno testovať v pripravovanom zariadení

### 6.2 Základná koncepcia testovacieho zariadenia

Základnou myšlienkou pri navrhovaní testovacej komory bol návrh testovacieho zariadenia, obr. 6.2, ktorý je používaný v americkej pobočke IMI CCI RSM na testovanie atmosférických rezistorov s prietokovým koeficientom  $C_V > 10$ .

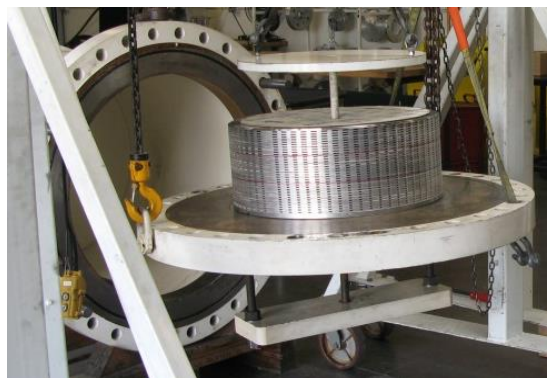




Obr. 6.2: Koncept testovacieho zariadenia pre  $CV > 10$

Z obr. 6.2 je možné vidieť, že usporiadanie zariadenia vychádza z požiadaviek popísaných v kapitole 4. V tomto prípade sa odberové miesto tlaku, pozícia č. 1 a 5 na obr. 6.2 nachádza na konci vstupného potrubia, čo nemá vplyv na výsledné meranie.

Princíp uchytenia atmosférického rezistoru spočíva v umiestnení testovanej vzorky medzi prítlačné teleso a vnútornú stranu krytu testovacieho bubnu, na ktorú sa prichytí pomocou skrutkového spoja obr. 6.3.



Obr. 6.3: Spôsob uchytenia atmosférického rezistoru v testovacom bubne

Pri návrhu rozmerov treba dbať nato aby výsledné testovacie zariadenie malo väčší prietokový koeficient ako testovaná vzorka. K určeniu rozmerov sa používa empirický vzťah 6.1 podľa [28]

$$C_{V_{\text{Fixture}}} = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) - \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot B_{FF} \quad [-] \quad (6.1)$$

Vzťah 6.1 popisuje výpočet vnútorného priemeru  $D$  testovacieho zariadenia, na základe, ktorého sa určí výška resp. dĺžka komory testovacieho zariadenia  $H$  z nasledujúceho vzťahu

$$(H - h) = 1.5 \cdot (D - d) \quad [-] \quad (6.2)$$

Je nutné podotknúť, že dané vzťahy boli odvodené z praktických skúsenosti z oblasti testovania ventilov a ich komponentov našimi kolegami z IMI CCI RSM. Tým pádom nie sú presné a ponúkajú iba orientačnú predstavu o tom, aké rozmery testovacia komora môže mať.

### 6.2.1 Výpočet rozmerov testovacieho zariadenia

Po dosadení maximálnych hodnôt z tabuľky 6.1 do vzťahu 6.1 a 6.2 dostaneme hodnoty určujúce vnútorný priemer  $D$  a dĺžku  $H$  komory testovacieho zariadenia.

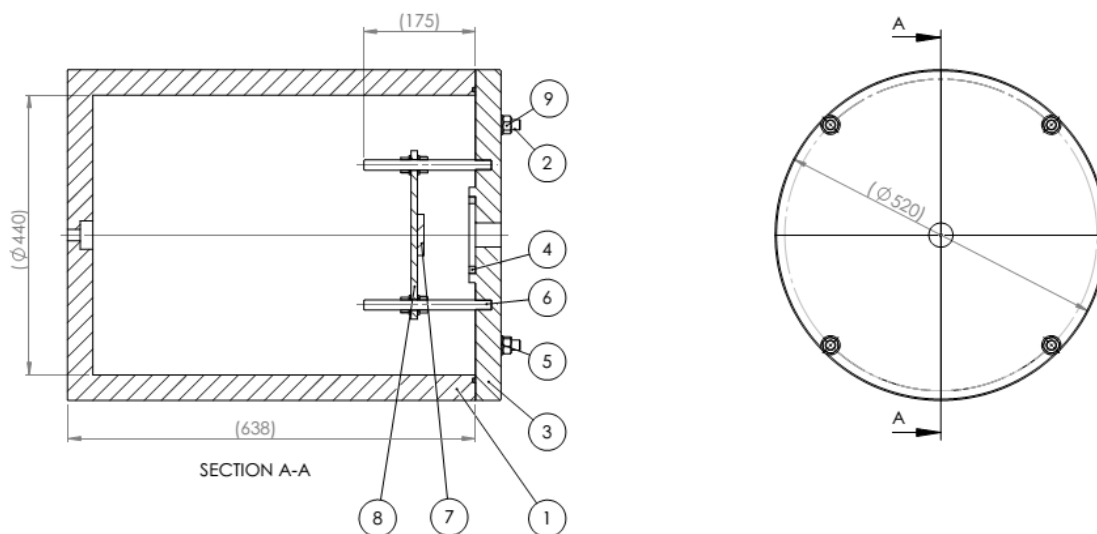
$$D = \sqrt{\frac{(C_{\text{Fixture}} \cdot 4)}{\pi}} + B_{FF} \cdot d^2 = \sqrt{\frac{10 \cdot 4}{\pi}} + 21 \cdot 121^2 = 554 \quad [\text{mm}] \quad (6.3)$$

$$H = h + 1.5 \cdot (D - d) = 110 + 1.5 \cdot (554 - 121) = 759,5 \quad [\text{mm}] \quad (6.4)$$

Po konzultácii s inžinierom z *NPD (New Project Development)* oddelenia sa dospelo k záveru, že vyššie vypočítané rozmery testovacej komory sú predimenzované a je možné ich upraviť a tým doceliť zníženie hmotnosti, ceny, zmenšenie potrebného strojového času na obrábanie. Vnútorný priemer a dĺžka testeru boli preto modifikované na hodnoty  $D = 440$  mm a  $H = 638$  mm.

### 6.3 Návrh testovacej komory

Hlavnú časť testovacieho zariadenia tvorí valcová komora, ktorej rozmery boli určené v kapitole 6.2.1. Na vstupnej strane komory sa nachádza otvor so závitom  $G \frac{1}{2}$  slúžiaci pre prívod vzduchu. Komora je uzatvorená víkom, na ktoré sa zároveň upevní atmosférický resistor pomocou prítlačného telesa a skrutkové spoja. Rez testovacím zariadením je znázornený na obr. 6.4. Kompletný výkres zostavy je v prílohe 1.

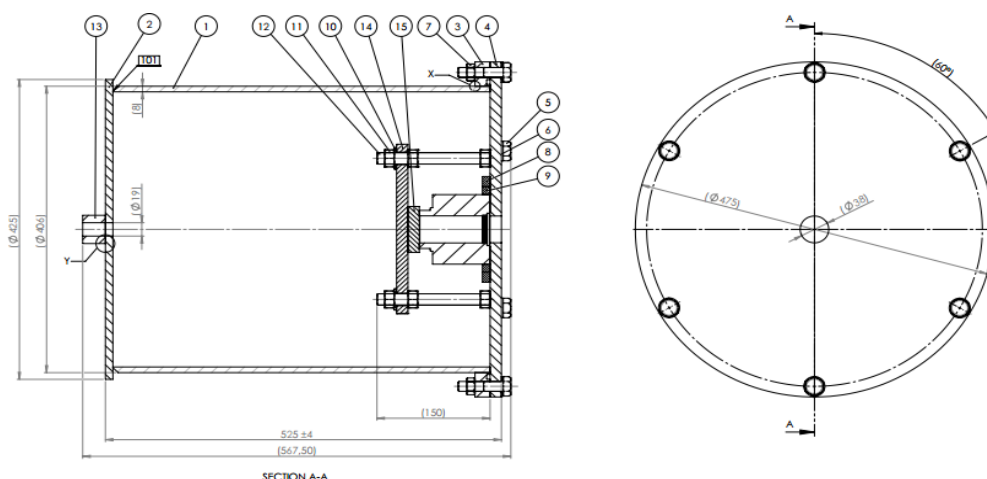


Obr. 6.4: Návrh prvej verzie testovacej komory

Ako materiál prvej verzie pre testovacie zariadenie a víko bol zvolený polotovár hliníková trubka. Použitím tohto typu polotovaru sa zvýšila hmotnosť zariadenia, vzrástol potrebný strojový čas na obrábanie a keďže sa jedná o atypický rozmer musela byť hliníková trubka vyrobená na zákazku, čo značne zvýši cenu celého zariadenia. Celková cena mechanickej časti testovacieho zariadenia je podľa cenového modelu 145 000 CZK a hmotnosť komory dosahuje 200kg.



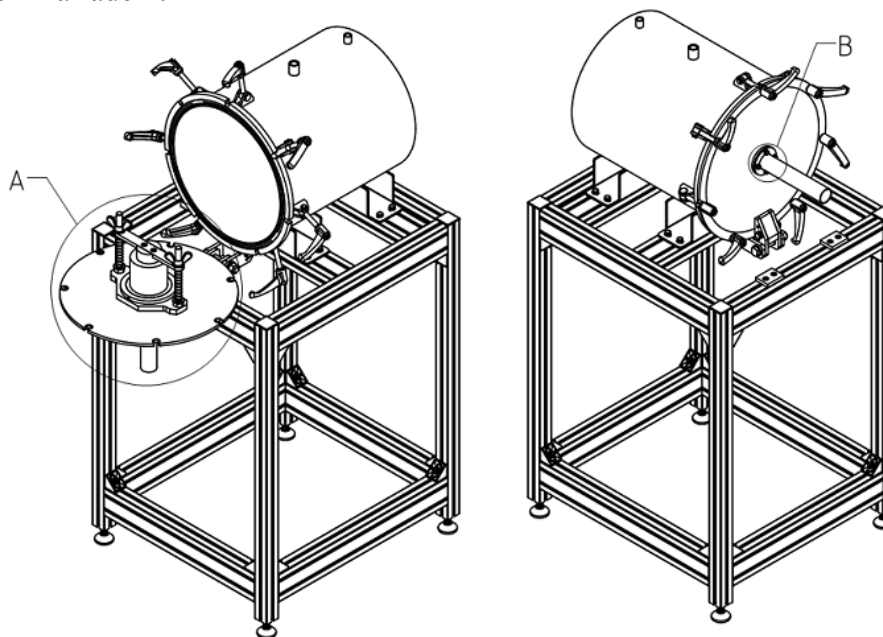
Vzhľadom na obmedzený rozpočet nastala zmena návrhu, ktorá mala viesť hlavne k zníženiu ceny a hmotnosti. Zmenou rozmerov komory na  $D = 406$  mm a  $H = 500$  mm a výberom vhodného typu materiálu polotovaru sa dosiahla jednoduchšia zvariteľnosť dielov, čo umožnilo rozdeliť testovacie zariadenie na 4 hlavné časti – vstupné víko, komora, príruka, víko a tak minimalizovať čas potrebný na obrábanie. Materiál S235JR a S353 sú bežne dostupné materiály so širokou ponukou rozmerov. Výkres zostavy je uvedený v prílohe 2.



Obr. 6.5: Optimalizovaná verzia testovacej komory

Hmotnosť samotného uzatváracieho víka sa pohybovala približne okolo 20 kg a pri použití najväčšieho atmosférického rezistoru z tabuľky 6.1 hmotnosť víka dosahovala 22.5 kg. Montáž a nasadzovanie predného krytu na testovací bubon by bola preto veľmi náročná. Z tohto dôvodu bolo nutné upraviť návrh predloženého riešenia a navrhnuť viac užívateľsky prijateľný spôsob otvárania a uzatvárania predného víka.

Bol navrhnutý otvárací mechanizmus, kde predné víko je prichytené pomocou pántu k telu testovacieho bubnu. V otvorenom stave je víko podopierané konštrukciou podstavca. Uzavíranie je prevedené pomocou rýchlo spojok. Navrhnuté riešenia značne uľahčili prácu na testovacom zariadení.



Obr. 6.6: Finálny návrh testovacieho zariadenia

Vzhľadom k celkovej vyťaženosti fabriky bola oslovená externá firma, ktorá prevzala výrobu testovacieho zariadenia na základe dodaných výrobných výkresov a výkresov zostavy. Boli predložené aj ďalšie špecifikácie a požiadavky ako stolík z hliníkových profilov, prizmatické podpory komory, demontovateľné ukládňovacie potrubie na výstupe. Finálny návrh testovacieho zariadenia je zobrazený na obr. 6.7. Výkres zostavy finálneho návrhu testovacieho zariadenia je uvedený v prílohe 3.



**Obr. 6.7: Finálna podoba vyrobeného testovacieho zariadenia**

Optimalizáciou celkového návrhu testovacieho zariadenia bolo dosiahnuté výrazne zníženie hmotnosti, ceny a zlepšila sa práca so zariadením. Celková cena mechanickej časti nepresiahla čiastku 100 000 CZK a hmotnosť bola znížená na 135 kg. Ako veľkou výhodou sa ukázala nosná časť testovacieho bubnu vyrobená z hliníkových profilov, ktorá umožňuje následné uchytenie pneumatickej a hardwarovej časti testovacieho zariadenia. Možným zlepšením stávajúcej konfigurácie je rozšírenie o výsuvný podstavec poskytujúci priestor pre inštaláciu atmosférických rezistorov do zariadenia, prácu s laptopom pri meraní alebo vyplňovanie protokolov pri meraní.

## 7 Automatizácia meracieho zariadenia

V nasledujúcej kapitole sa budem zaoberať vhodnou voľbou hardwaru na zber dát a ovládanie prvkov pneumatického obvodu. Ďalej bude vytvorené schéma zapojenia snímačov a solenoidov s meracím zariadením, ako aj výber vhodných ochranných prvkov pre potrebné zdroje napätia.

### 7.1 Voľba hardwaru

Na ovládanie pneumatických prvkov a zber dát zo snímačov bol zvolený hardware od National Instruments, konkrétne cDAQ – 9174, ktorý je možné osadiť štyrmi meracími kartami tzv. C Series Modules poskytujúcimi analógové, digitálne vstupy a výstupy. Výhodou použitia zvoleného hardwaru je jednoduché použitie, ľahká modifikovateľnosť na iný typ úlohy, možnosť programovania v grafickom programovacom jazyku LabVIEW.

Použité tlakomery a prietokomery OMEGA v pneumatickom obvode majú analógový prúdový výstup 4 – 20 mA. Na zaznamenávanie prúdového signálu je použitá meracia karta NI 9203. Na ovládanie proporcionálneho ventilu prúdovým signálom v rozsahu 4–20 mA bol zvolený modul NI 9265. Otváranie a zatváranie solenoidov je riadené digitálnym signálom z karty NI 9375. Posledný slot v šasi zaberá univerzálna meracia karta NI 9219 s analógovým napäťovým vstupom pre prietokomer Bronkhorst a vstupom pre termočlánok.

#### 7.1.1 cDAQ 9174

Meracie zariadenie cDAQ – 9174 bolo primárne určené pre malé, prenosné meracie a testovacie zariadenia. Obsahuje 4 sloty vybavené 32-bitovými čítačmi a časovačmi, ktoré sú priamo zabudované v šasi prístroja. Umožňuje beh siedmich paralelných úloh využívajúcich vstupné/výstupné moduly.

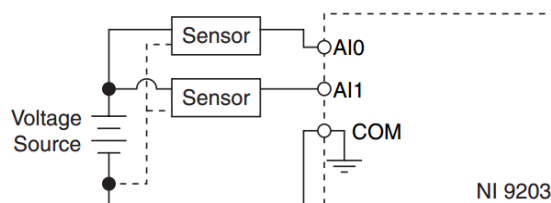


Obr. 7.1: cDAQ 9174 [29]

Slot pre konektor RJ-45 zabezpečuje spoľahlivú komunikáciu s osobným počítačom pomocou UTP kabeľu. K napájaniu je použitý AC/DC konvertor poskytujúci potrebné jednosmerné napájacie napätie 9 – 30 V. [29]

### 7.1.2 C Series Module NI 9203

Meracia karta NI 9203 poskytuje 8 analógových vstupných kanálov. Každý kanál poskytuje vstupný terminál, na ktorý je možné pripojiť prúdový signál v rozsahu 4 – 20 mA. Všetkých 8 kanálov je vnútorne prepojených s COM terminálom a následne s izolovanou zemou. Vstupný signál smeruje do vyrovnávacej pamäti, kde je zosilnený a následne navzorkovaný 16 bitovým ADC prevodníkom.[30]

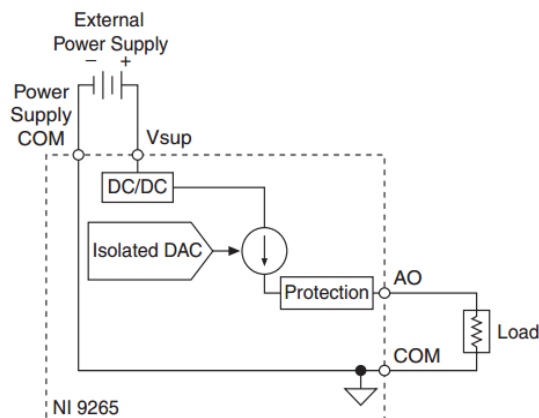


Obr. 7.2 : Zapojenie snímačov s prúdovým výstupom do karty NI 9203 [30]

Do meracej karty NI 9203 vstupujú signály z tlakomerov a prietokomerov OMEGA. Schéma zapojenia snímačov s meracou kartou a nastavenie karty v DAQ Assistant je znázornená na obr. 7.2.

### 7.1.3 C Series Module NI 9265

Modul NI 9265 je vybavený 4 kanálmi s analógovým výstupom. Karta má vstupné svorky  $V_{sup}$  a Power Supply COM pre pripojenie externého zdroja napätia potrebného pre vytvorenie prúdového signálu. Analógové výstupy sú spojené cez COM terminály s izolovanou zemou. Výstupný prúdový signál v rozsahu 4 – 20 mA z jednotlivých kanálov je produkováný pomocou DAC prevodníku s rozlíšením 16 bitov. [31]

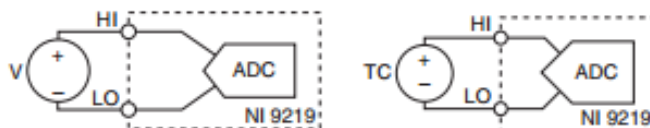


Obr. 7.3: Zapojenie proporcionálneho ventilu na kartu NI 9265 ovládaného prúdovým signálom [31]

Karta NI 9265 generuje ovládací prúd pre proporcionálny ventil v rozsahu 11 – 20 mA, kde prúdový interval 11 – 12 mA odpovedá uzatvorenému ventilu a hodnota prúdu medzi 12 – 20 mA proporcionálne ovláda výstupný prietok ventilu. Zapojenie proporcionálneho ventilu a karty NI 9265 je na obr. 7.3. Poznamenajme, že v našom prípade je daný ventil použitý na regulovanie pomeru diferenčného tlaku  $x$  pomocou množstva prúdiaceho vzduchu do testovacej komory zariadenia.

### 7.1.4 C Series Module NI 9219

Meracia karta NI 9219 je univerzálna karta so 4 vstupnými kanálmi. Každý z kanálov obsahuje 6 terminálov, na ktoré je možné pripojiť rôzne typy snímačov a signálov – prúdový, napäťový signál, termočlánok, odporové čidla RTD a H – mostík. Podľa použitého typu snímača sa líši zapojenie do jednotlivých terminálov daného kanála. [32]

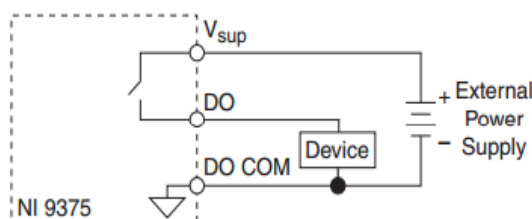


Obr. 7.4: Zapojenie napäťového analógového výstupu prietokomeru Bronkhorst a termočlánku typu T na kartu NI 9219 [32]

V našom zapojení univerzálna karta NI 9219 poskytuje vstupný kanál pre termočlánok TC typu T na meranie teploty vo vnútri testovacej komory a analógový napäťový vstup pre prietokomer Bronkhorst MASS-VIEW. Zapojenie termočlánku a prietokomeru na kartu je znázornené na obr. 7.4.

### 7.1.5 C Series Module 9375

Karta NI 9375 poskytuje pripojenie k 16 digitálnym vstupným kanálom a k 16 digitálnym výstupným kanálom. Každý kanál digitálneho výstupu obsahuje terminál, na ktorý je možné priamo pripojiť zariadenie. [36]



Obr. 7.5 : Zapojenie elektromagnetických sedlových ventilov na digitálne výstupy karty NI 9375 [33]

V prípade použitia digitálnych výstupov je nutné pripojiť zdroj externého napätia 24 Vdc na svorky  $V_{sup}$  a  $DO\ COM$ . Pomocou karty NI 9375 je ovládané zapínanie a vypínanie elektromagnetických sedlových ventilov v jednotlivých linkách pneumatického obvodu.

## 7.2 Ochranné prvky meracieho hardwaru

Zariadenie sa zapína pomocou jednopoložového vačkového spínača, ktorý je možno zamknúť a tým zabrániť nežiaducemu zapnutiu elektrickej časti.

Pred zdrojmi jednosmerného napätia MEANWELL SDR-120-24 sú umiestnené ističe poskytujúce ochranu rozpojením elektrického obvodu v prípade nadmerného toku prúdu, čím sa zabráni preťaženiu zariadenia.

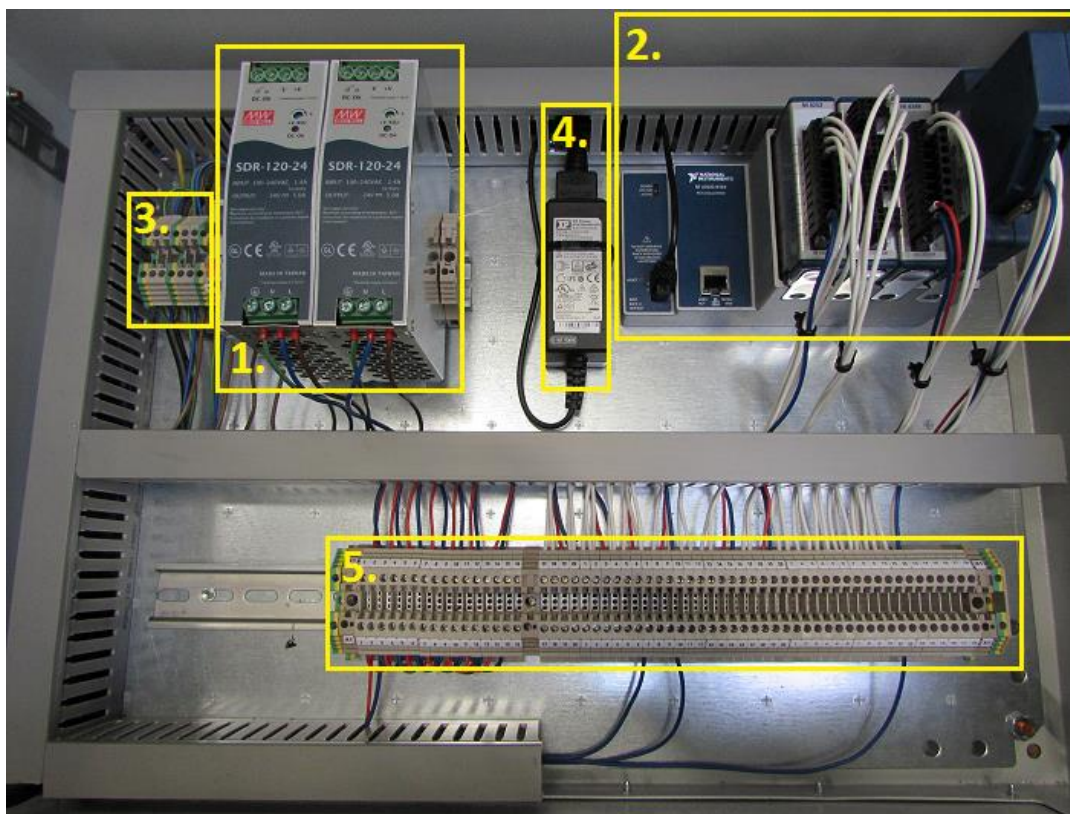
Na ochranu solenoidov proti náhlím napäťovým špičkám vznikajúcich v indukčnej záťaži pri odstránení alebo znížení napätia je použitá ochranná dióda.



## 7.3 Zapojenie meracej časti

Konfigurácia meracieho hardwaru, ktorý sme definovali v kap. 7.1. bol zostavený a zapojený podľa daných požiadaviek na meranie fyzikálnych veličín potrebných pre určenie výsledného prietokového koeficientu  $C_v$ . Zapojenie celej zostavy meracieho hardwaru je možné vidieť na obr. 7.6.

Kompletné elektrické schéma zapojenia jednotlivých snímačov s modulmi a zdrojmi jednosmerného napätia je uvedené v prílohe 4.



Obr. 7.6: Zapojenie meracej časti. Pozícia 1 – zdroj 24 Vdc; 2 – cDAQ – 9174; 3 – rozvod 230 AC; 4 – napájací zdroj cDAQ – 9174 s modulmi; 5 – svorkovnice

Merací hardware je umiestnený v rozvodnej skrini o rozmeroch 600x400x300 mm, čo poskytuje primárnu ochranu pred úrazom elektrickým prúdom a zabráňuje prípadnému zásahu nepovolaných osôb do elektroniky meracej zostavy. Signálové vodiče ako aj napájacie vodiče sú umiestnené v plastových lištách, čo zvýšilo prehľadnosť zapojenia a bezpečnosť práce na zariadení.

K napájaniu jednotlivých snímačov – prietokomery, tlakomery, karty NI 9265 a proporcionálneho ventilu VP 60 je použitý zdroj MEANWELL SDR-120-24, ktorý poskytuje jednosmerné napätie 24 Vdc. Rovnaký zdroj je použitý ako zdroj jednosmerného napájacieho napätia pre digitálnu kartu NI 9375, ktorá generuje digitálny signál na ovládanie solenoidov v jednotlivých vetvách pneumatického obvodu. Oba zdroje sú napájané zo zdroja striedavého napätia 230 V cez istič. Jednosmerný zdroj napätia, vstupy/výstupy z meracích kariet sú privedené na svorkovnicu, na ktorú sa napájajú vodiče snímačov, solenoidov a proporcionálneho ventilu vedúcich z pneumatického obvodu.

Návrhom na zlepšenie súčasnej konfigurácie je rozšírenie o svetelnú signalizáciu (zariadenie je/nie je v činnosti), bezpečnostný vypínač, ktorý by v prípade poruchy zastavil prívod stlačeného vzduchu do systému a odtlakoval jednotlivé linky pneumatického obvodu.

## 8 Realizácia software a overenie testovacieho zariadenia

Cieľom v nasledujúcej kapitole bude vytvoriť software na ovládanie zariadení pneumatického obvodu, zber a vyhodnotenie dát zo snímačov a výpočet prietokového koeficientu  $C_v$ . Software je realizovaný v prostredí od spoločnosti National Instruments LabVIEW 2013. Pre vytvorenie software je použitá metóda založená na riadení funkcií aplikácie pomocou udalostí tzv. udalosťami riadené programovanie. Finálna verzia aplikácie je následne pomocou modulu Application builder konvertovaná na spustiteľný .exe súbor.

### 8.1 Požiadavky na funkcie softwaru

Základnou požiadavkou na software je jeho jednoduchosť ovládania, prehľadnosť a intuitívne ovládanie. Ďalšou požiadavkou je zápis meraných veličín do textového súboru. Výsledné hodnoty prietokového koeficientu  $C_v$  sú vynesené v grafe v závislosti na hodnotách diferenčného tlaku  $x$ .

Zhrnutie požiadaviek:

- Jednoduchosť ovládania
- Prehľadnosť užívateľského rozhrania
- Zápis meraných veličín do súboru
- Vykreslenie prietokového koeficientu v závislosti na pomere diferenčného tlaku

### 8.2 Riadenie vykonávania funkcií programu

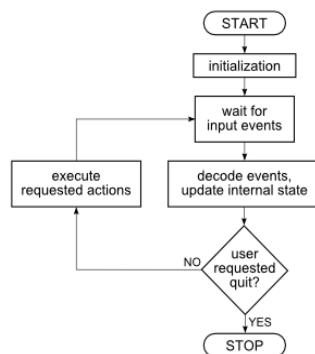
Spôsob, akým jednoducho a efektívne vytvoriť rôzne druhy aplikácií je použitie stavového automatu. Stavový automat používa k riadeniu a vykonávaniu jednotlivých alebo viacerých funkcií udalosti. V prostredí LabVIEW je možnosť vytvárania takýchto aplikácií s grafickým užívateľským prostredím, umožňujúce priamu interakciu užívateľa a tak ovplyvnenie toku programu.

#### 8.2.1 Udalosťami riadené programovanie

Udalosťami riadené programovanie je spôsob vytvárania aplikácie, v ktorej je vykonávanie jednotlivých funkcií programu riadené pomocou udalosti. Po spustení programu aplikácia čaká na výskyt udalosti. Udalosťou nazývame akciu, ktorá je vyhodnotená programom, a na ktorú program zareaguje vykonaním príslušných príkazov odpovedajúcich danej udalosti. Program je možné prerušiť udalosťou, ktorá spustí sériu príkazov na jeho ukončenie.

#### 8.2.2 Udalosť

Zdrojmi udalostí najčastejšie bývajú akcie vykonávané užívateľom ako napr. pohyb a klik myši, stlačenie určitej klávesy, alebo vstupy a výstupy pochádzajúce z HW časti. Iné typy udalostí môžu byť vytvárané programovo a použité ku komunikácii s inými časťami programu.

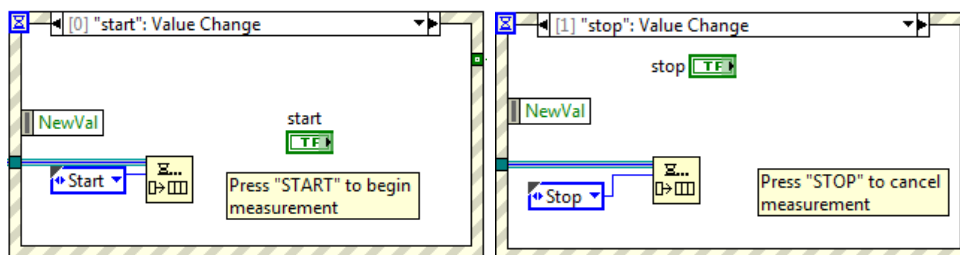


Obr. 8.1: Beh program vytvoreného pomocou metódy event-driven programming  
Prevzaté z : [http://library.morph.zone/Event Driven Programming, Notifications](http://library.morph.zone/Event_Driven_Programming_Notifications)

Na pracovanie s udalosťami sa v prostredí LabVIEW používa štruktúra nazývaná Event Structure, ktorá obsahuje stavy, kde každý z nich čaká na príchod jednej alebo viacerých udalostí, pričom iba jedna udalosť sa môže vyskytnúť v daný čas.

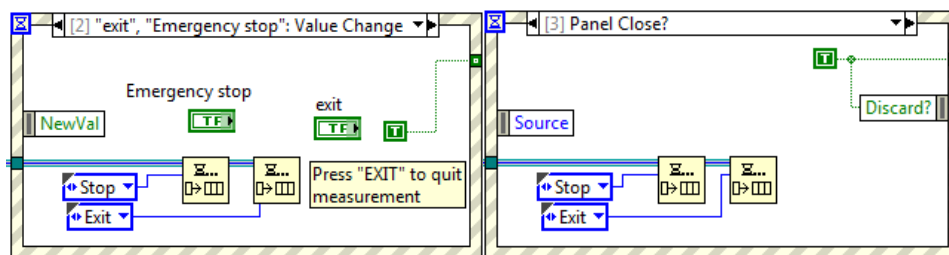
Zoznam a popis funkcií udalosti použitých v našej aplikácii sú nasledovné:

- 1) *Start* - po spustení aplikácie sa čaká na zdroj udalosti *Start Measurement*, ktorý spustí meranie



Obr. 8.2: Udalosť Start (vľavo) a udalosť stop vpravo

- 2) *Stop* - v prípade, že aplikácia zaznamená výskyt udalosti *Stop*, ktorú spúšťa tlačidlo *Stop Measurement*, program uzavrie prívod vzduchu a odtlakuje pneumatický obvod.



Obr. 8.3: Udalosť Exit vľavo a udalosť Panel Close vpravo

- 3) *Exit* - po aktivácii tlačidla Exit Program aplikácia podobne ako v prípade udalosti *Stop* uzavrie prívod vzduchu, odtakuje pneumatický obvod a ukončí program.
- 4) *Panel Close* – zatvorením okna aplikácie sa spustí séria príkazov na ukončenie behu programu

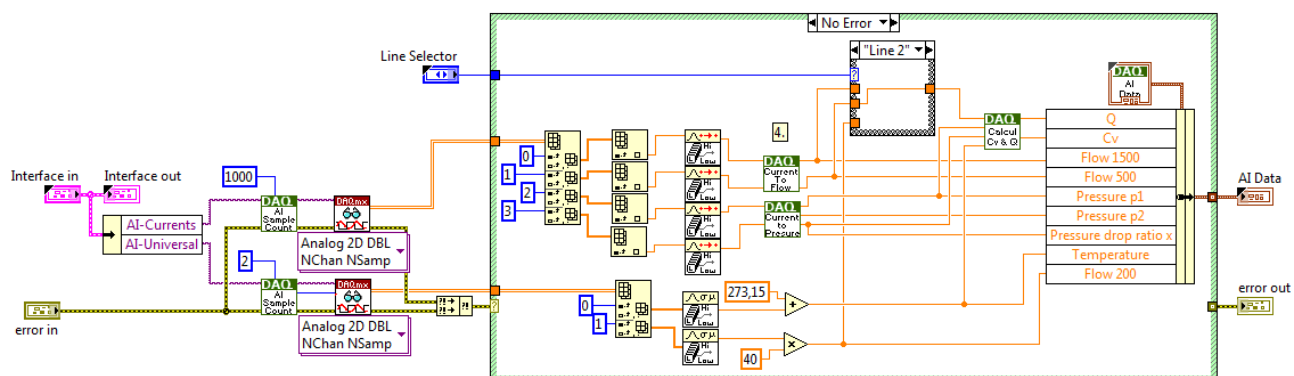


## 8.3 Nastavenie komunikácie s C Series Modulmi

Aby sme mohli zaznamenávať dáta zo snímačov je nutné vytvoriť pre modul tzv. *task*, ktorý obsahuje virtuálne kanály o jednotlivých fyzických kanáloch. K tomuto účelu slúži DAQ Assistant v prostredí LabVIEW.

Virtuálny kanál obsahuje informácie o tom, aký druh signálu sa prijíma/generuje, na ktorý fyzický kanál meracej karty je snímač napojený, rozsah meraného/generovaného signálu, mód, v ktorom chceme signál zaznamenávať, jeho vzorkovaciu frekvenciu a počet vzoriek.

Takto vytvorený *task* pre daný modul prepojíme s funkciou DAQmx Read/Write podľa toho či sa jedná o zápis dát alebo generovanie signálu. Podľa počtu pripojených zariadení na jednu kartu nastavíme vhodný parameter tejto funkcie, ktorý rozhoduje o formáte výstupnej hodnoty.



**Obr. 8.4: Čítanie analógových vstupov, filtrácia a scaling signálu**

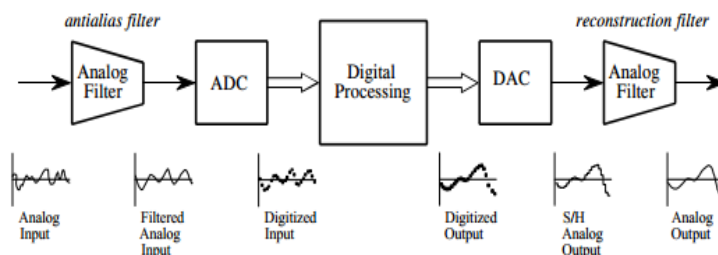
## 8.4 Spracovanie výstupného analógového signálu snímačov

Pri pracovaní s analógovými snímačmi v meracej technike je výstup snímača výrazne ovplyvnený šumom. Šum sú zmeny na výstupe snímača v ustálenom stave tzn. vstup snímača sa nemení. Aby sme mohli použiť takýto signál je nutné ho najprv upraviť pomocou filtrácie.

V nasledujúcej kapitole je popísaný postup filtrácie analógových signálov zo snímačov použitím štatistickej metódy medián.

### 8.4.1 Filtrácia signálu pomocou analógového filtra

Na obr. 8.5 môžeme vidieť blokový diagram spracovania analógového signálu skladajúceho z analógového filtra, ADC prevodníku, digitálneho spracovania a DAC prevodníku.



**Obr. 8.5: Základne blokové schéma spracovania signálu [33]**

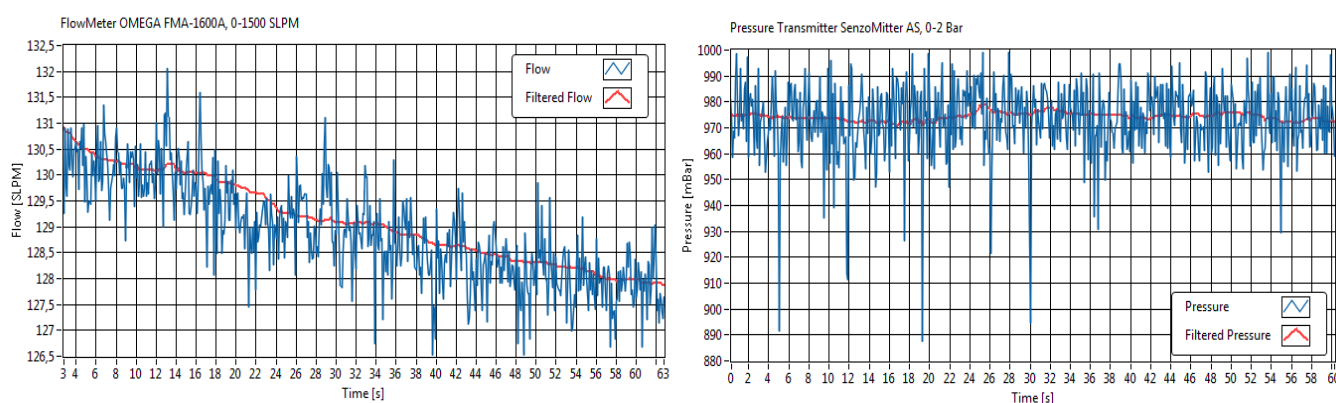
Analógový filter umiestnený pred ADC prevodník má za úlohu odstrániť zložky signálu s frekvenciou väčšou ako je polovica vzorkovacej frekvencie. Rekonštrukčný filter odstraňuje frekvencie väčšie ako je dvojnásobok šírky pásma.

ADC prevodník prevádza analógovú veličinu do číslicovej podoby, pričom DAC prevodník prevádza číslicovú podobu signálu späť na analógovú veličinu. Výstupom časti digitálneho spracovania je signál, ktorý môžeme ďalej spracovávať, vyhodnocovať, ukladať a podobne. [33]

Použité C Series Moduly od National Instruments nie sú vybavené analógovým filtrom pred ADC a za DAC prevodníkom. Filtrácia signálu prebieha v prostredí LabVIEW pomocou digitálneho filtru.

## 8.4.2 Filtrácia šumu analógového signálu pomocou digitálneho filtru

Pôvodný prúdový analógový výstup prietokomeru OMEGA a tlakomeru prepočítaný na jednotky prietoku a tlaku je znázornený na obr. 8.6.



Obr. 8.6: Pôvodný (modrá) a filtrovaný (červená) prúdový analógový signál snímačov

Z obr. 8.6 je možné vidieť, šum v oboch prípadoch značne ovplyvňuje výstup snímačov. V prípade merania tlaku sú výrazne špičky v signály, ktoré môžu byť spôsobené použitím pripojovacích vodičov bez tienenia ako aj jeho citlivosťou na zmenu dynamického tlaku vo vnútri testovacej komory.

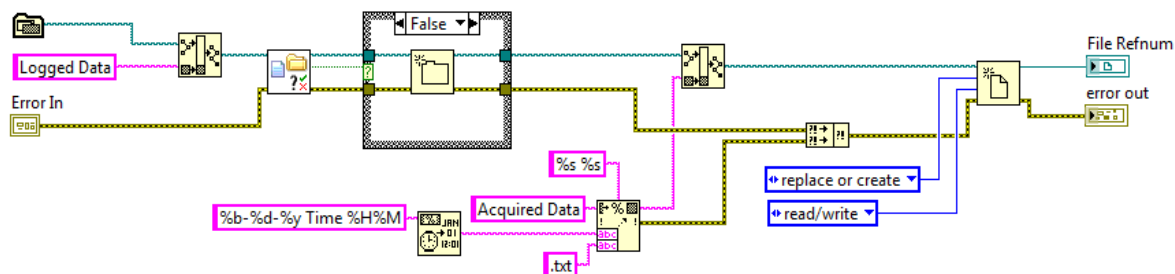
$$P(X \leq m) \geq 0,5 \text{ \& } P(X \geq m) \geq 0,5 \quad [-] \quad (8.1)$$

Na filtrovanie signálu bola použitá štatistická metóda medián, ktorá rozdeľuje súbor dát podľa veľkosti zoradených prvkov na dve polovice, kde najmenej 50% dát je menších alebo rovných a najmenej 50% dát je väčších alebo rovných mediánu. Medián je potom hodnota nachádzajúca sa v strede súboru zoradených prvkov, vzťah 8.1.

V LabVIEW je tento filter realizovaný funkciou *Median PtByPt.vi* a zapojenie s výstupným analógovým signálom je znázornený na obr. 8.4.

## 8.5 Zápis dát do súboru

Po spustení štartu merania sa automaticky, v prípade, že ešte neexistuje, vytvorí zložka *Logged Data* a následne textový súbor s názvom *Acquired Data* v adresári, kde je aplikácia uložená. Táto časť programu je znázornená na obr. 8.7.



Obr. 8.7: Vytvorenie adresára Logged Data a textového súboru Acquisition Data

Na ovládacom paneli užívateľ zadá svoje meno, osobné číslo a číslo projektu testovaného atmosférického rezistoru. Tieto údaje tvoria hlavičku textového súboru *Acquisition Data*. Spolu s hlavičkou súboru sa vytvorí riadok s veličinami, ktoré sa do súboru zapisujú – pomer diferenčného tlaku  $x$ , prietokový koeficient  $C_v$ , prietok  $Q$ , tlak  $p_1$ , tlak  $p_2$ , teplota  $T$ .

## 8.6 Popis programu a merania

Po spustení programu je aplikácia v stave *Ready*, kedy sú proporcionálny ventil a elektromagnetické sedlové ventily uzatvorené, a čaká sa na udalosť, ktorá spúšťa meranie. Meranie sa aktivuje pomocou tlačidla *Start Measurement*, ktorého aktivácia vyvolá sled operácií a do fronty sa zapíše stav *Start*. V tomto stave prebieha spustenie modulov s analógovými vstupmi a funkcia na vytvorenie adresára a textového súboru pre zápis meraných hodnôt. Po vykonaní týchto operácií je do fronty zapísaný stav *Measure*. V stave *Measure* sa pomocou manuálneho ovládania proporcionálneho ventilu nastaví prietok testovacím zariadením tak, aby sme dosiahli požadovanú hodnotu pomeru diferenčného tlaku. Následne zvolíme pomocou funkcie *Line selector* linku v pneumatickom obvode s prietokomerom s odpovedajúcim rozsahom. Tlačidlom *Write Measurement* zapíšeme merané hodnoty do súboru. V prípade ukončenia merania aktiváciou tlačidla *Exit Measurement* resp. *Emergency Stop* je do fronty zapísaný stav *Stop*, v ktorom sa uzavrie proporcionálny ventil a elektromagnetické ventily. V prílohe 5 sú uvedené jednotlivé stavy programu.

## 9 Overenie funkčnosti testovacieho zariadenia

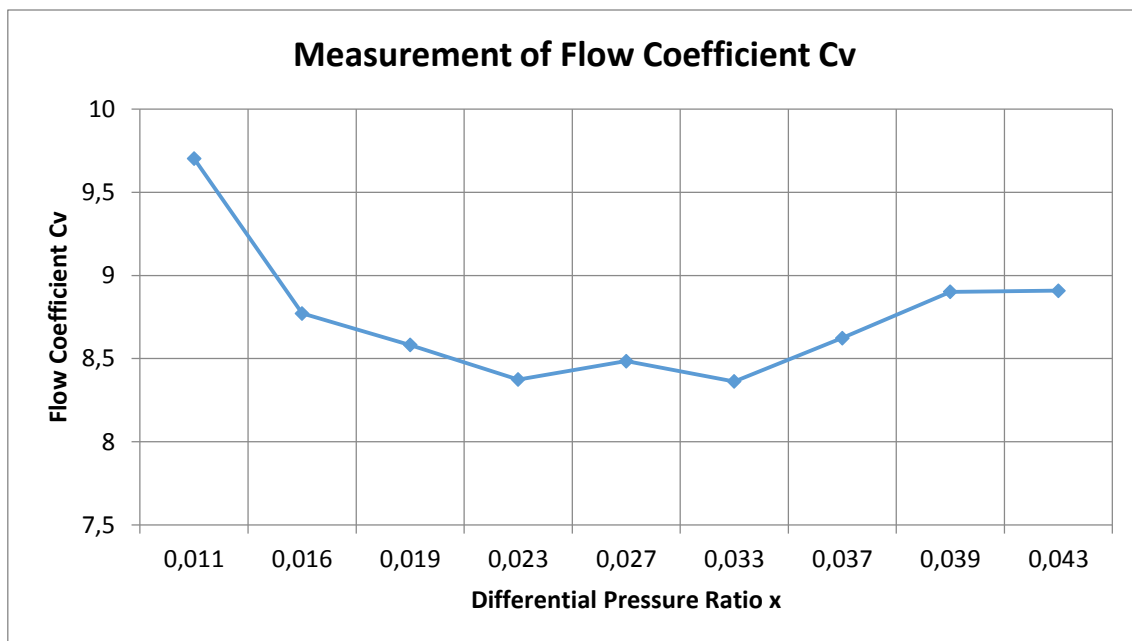
V tejto časti prevedieme overenie funkčnosti vytvoreného software a konfigurácie pneumatického obvodu, hardwarovej časti a testovacej komory. Postup a vyhodnotenie merania je popísané v [12]. Zo zaznamenaných fyzikálnych veličín sa vyhodnotí pomer diferenčného tlaku  $x$  a prietokového koeficientu  $C_v$  a následne sa závislosť týchto dvoch hodnôt vykreslí do grafu.

V tabuľke 9.1 sú uvedené hodnoty z prvého merania atmosférického rezistoru s priemerom vnútorným priemerom 16 mm.

IMI CCI Special Testing Facility Date: 14.5.2015 Time: 10:39 Tester: Milan Kerek Personel Number: 811 Project :					
$x$ [bar]	$C_v$	$Q$ [slpm]	$p_1$ [bar]	$p_2$ [bar]	Temperature [K]
0,011	9,703	377,863	0,994	0,983	297,79
0,016	8,772	420,301	0,998	0,982	297,738
0,019	8,582	450,37	0,996	0,977	297,692
0,023	8,374	487,907	0,999	0,976	297,624
0,027	8,485	533,586	1,004	0,977	297,582
0,033	8,363	583,569	1,013	0,98	297,501
0,037	8,624	644,076	1,015	0,977	297,476
0,039	8,902	685,53	1,022	0,982	297,435
0,043	8,908	718,934	1,026	0,982	297,423

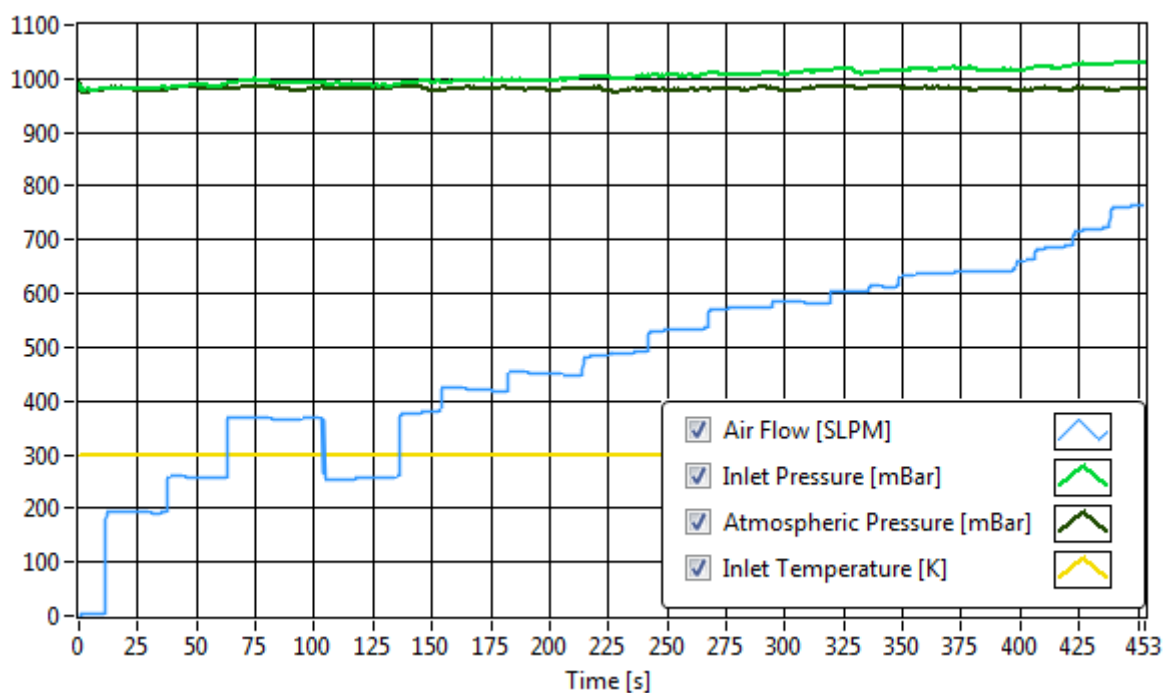
Tabuľka 9.1: záznam priebehu merania

Závislosť hodnôt medzi pomerom diferenčného tlaku a prietokovým koeficientom boli vynesené do grafu obr. 9.1. Charakteristika závislosti má predpokladaný priebeh ale k overeniu správnosti merania je nutné zaslať testovaný atmosférický rezistor do testovacieho zariadenia v USA alebo Kórei, kde sa overí presnosť nášho zariadenia.



Obr. 9.1: Závislosť pomeru diferenčného tlaku a prietokového koeficientu

Ako už bolo spomenuté v kapitole 5.9, množstvo zátačiek a rýchlo spojok, ktoré fungujú ako rezistory spôsobujú pokles prietoku vplyvom tlakového spádu v týchto miestach. Tento priebeh je znázornený na obr. 9.2. Pri maximálnom otvorení proporcionálneho ventilu bol dosiahnutý maximálny prietok v intervale 850 – 900 SLPM.



Obr. 9.2: Záznam priebehu meraných veličín a ukážka poklesu prietoku

Pre odstránenie tohto problému je nutné optimalizovať trasu prietoku média minimalizovaním počtu zátačiek potrubia a rezistorov v podobe rýchlo spojok a prechodných závitových členov medzi jednotlivými prvkami pneumatického obvodu.

## 10 Zhodnotenie parametrov testovacieho zariadenia a posúdenie ekonomického prínosu

Navrhnuté zariadenie je určené pre testovanie a overenie funkčnosti atmosférických rezistorov s prietokovým koeficientom  $C_v < 10$ . Systém uchytenia rezistorov v komore umožňuje testovať vzorky atmosférických rezistorov s maximálnym vnútorným priemerom 38 mm. Mechanizmus uzatvárania testovacej komory je užívateľsky prijateľné a zjednodušuje prácu a inštaláciu rezistora do zariadenia. Zariadenie vyžaduje zdroj stlačeného vzduchu 10 bar.

Hmotnosť testovacej komory s podstavcom	125 kg
Celková hmotnosť zariadenia	170 kg
Zdroj média	Stlačený vzduch 10 bar
Maximálny prietok	1500 slpm
Maximálny tlak v komore	2 barA
Maximálny priemer trimu	38 mm
Maximálny priemer atmosférického rezistoru	121 mm
Maximálna výška atmosférického rezistoru	170 mm

Tabuľka 10.1: Parametre testeru

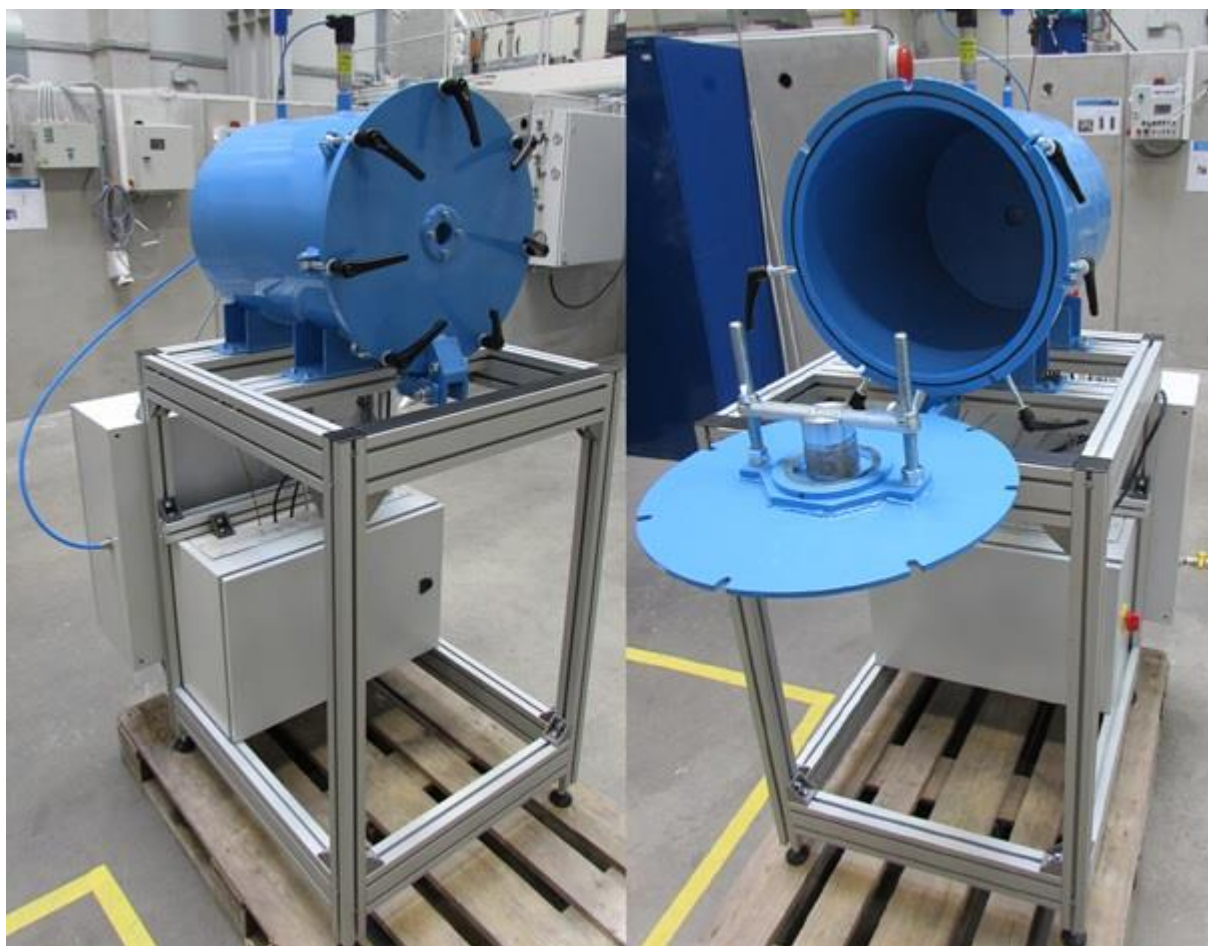
Systém snímačov je prepojený s hardwarom od spoločnosti National Instruments, ktorý je vybavený meracími kartami C Series Modules, ktoré merajú analógový signál zo snímačov a ovládajú proporcionálny ventil a elektromagnetické sedlové ventily. Maximálny možný prietok a tlak, ktorý je možno merať je 1500 slpm a 2 barA. Software na zber a vyhodnotenie dát je vytvorený v prostredí LabVIEW 2013. Merané veličiny sú zapisované do textového súboru s hlavičkou s informáciami o osobnom čísle, mene pracovníka, ktorý meranie robil, dátume a čísle projektu. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené finančné náklady spojené s výrobou testovacieho zariadenia.

Názov položky	Množstvo	Cena [Czk]
Testovacia komora s podstavcom	1	95 000
cDAQ 9174	1	24 000
NI 9203	1	15 700
NI 9219	1	31 000
NI 9265	1	10 870
NI 9375	1	11 690
OMEGA FMA -1600A 1500 SLPM	1	75 000
OMEGA FMA – 1600A 500 SLPM	1	55 000
Proporcionálny ventil VP60	1	-
Prietokomer Bronkhorst	1	-
Elektromagnetický sedlový ventil	6	12 000
Regulátor tlaku a filter	1	-
Rýchlo spojky a priechodky	-	2 000
Rozvodné skrine	2	8 000
Elektroinštačný materiál	-	10 000
Celková cena	-	350 260

Tabuľka 10.2: Nacenenie výroby testovacieho zariadenia

V rámci korporácie IMI sa jedná o tretie zariadenia na testovanie prietokového koeficientu atmosférických rezistorov s  $C_V < 10$ . Vzhľadom k tomu, že ďalšie dve testovacie stanice sa nachádzajú v USA a v Kórei, hlavným profitom je časová úspora, ktorá by bola spojená s dopravou do jednej z testovacích lokácií. Ďalšou výhodou je možnosť vývoja nových konfigurácií atmosférických rezistorov a následné overenie funkčnosti priamo v IMI CCI Czech Republic.

Finálna podoba navrhnutého a realizovaného testovacieho zariadenia, s nainštalovaným pneumatickým obvodom a meracím hardwarom, pre spoločnosť IMI CCI Brno je znázornená na obr. 10.1.



**Obr. 10.1: Zariadenie na testovanie funkčnosti atmosférických rezistorov**

## 11 Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bol návrh zariadenia na testovanie funkčnosti atmosférických rezistorov pre spoločnosť IMI CCI Czech Republic, ktorá sa zaoberá vývojom a výrobou vysokotlakových ventilov pre kritické aplikácie.

V úvode práce bola popísaná problematika atmosférických rezistorov, princíp ich činnosti a parametre, ktoré definujú ich vlastnosti a oblasť použitia. Hlavným parametrom popisujúci atmosférický rezistor je prietokový koeficient  $C_v$ .

Ďalej sa v práci venujem návrhu usporiadania testovacieho zariadenia, ktoré je dané hlavne internou procedúrou spoločnosti IMI CCI TP – 522 a normou BS EN 60534, ktoré definujú správne meranie a vyhodnotenie merania prietokového koeficientu armatúr. Procedúra TP – 522 predpisuje

Piata kapitola tejto práce je zameraná na výber a voľbu prvkov pneumatického obvodu a snímačov prietoku, tlaku a teploty. Na vstup pneumatického obvodu bol umiestnený regulátor tlaku a filter. Hlavnú časť pneumatického obvodu tvoria tri linky, kde na každej je umiestnený prietokomer s rôznym meracím rozsahom. Podľa aktuálnej hodnoty prietoku, ktorú reguluje proporcionálny ventil sa pomocou dvojice elektromagnetických solenoidových ventilov nachádzajúcich sa pred a za prietokomerom, usmerní prietok média do linky s prietokomerom s príslušným rozsahom. Po zostavení pneumatického obvodu, ktorý je umiestnený v rozvodnej skrini bol odhalený nedostatok v podobe použitia rýchlo spojok a množstva zatáčiek v potrubí, ktoré fungujú ako rezistory a spôsobujú tlakovú stratu v obvode a tým aj pokles prietoku. Návrhom na odstránenie problému je nahradenie stavajúceho potrubia kovovými trúbkami a prevlečnými maticami.

Mechanická časť testovacieho zariadenia pozostáva z testovacieho bubnu umiestneného na prizmatických podperách a stolíku vyrobeného z hliníkových profilov. Atmosférický rezistor sa umiestni a uchyťí na predné víko testovacieho zariadenia. Vzduch prúdi cez pneumatický obvod na vstup testovacej komory, kde je umiestnený tlakomer a termočlánok. Na výstupnej strane sa nachádza ďalší zo série tlakomerov, ktorým sa meria atmosférický tlak.

Ako merací hardware bol zvolený cDAQ 9174 a C Series Moduly na zber dát zo snímačov a ovládanie proporcionálneho ventilu a elektromagnetických sedlových ventilov. Napájanie systému poskytujú dva zdroje jednosmerného napätia. Jeden zo zdrojov je určený iba pre napájanie solenoidových ventilov.

Po prepojení jednotlivých častí testovacieho zariadenia bol vytvorený software pre zber a analýzu dát v prostredí LabVIEW. Následne bolo zariadenie otestované s reálnou vzorkou atmosférického rezistoru. Výstupom merania je závislosť pomeru diferenčného tlaku a prietokového koeficientu. Charakteristika závislosti má predpokladaný priebeh ale na potvrdenie správnosti merania je nutné zaslať testovaný atmosférický rezistor na kontrolu do jednej z testovacích laboratórií.



## 12 Použité informačné zdroje

- [1] VYBÍRAL, Bohumil. *Mechanika ideálných plynů* [online]. Dostupné z WWW: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/plyny.pdf>
- [2] A. D. McNaught and A. Wilkinson (1997). IUPAC. Compendium of Chemical Terminology (2nd ed.). Oxford: Blackwell Scientific Publications. ISBN 0-9678550-9-8
- [3] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. 2005. *Měření průtoků a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 447 s. ISBN 80-730-0156-X
- [4] KADLEC, Karel. *Snímače průtoků – principy, vlastnosti a použití (část 1)*, [online]. Automa, 2010, č.6, 5-8 s. [cit. 2015-05-04] Dostupné z WWW: <http://automa.cz/download/au100605.pdf>
- [5] ORLÍKOVÁ, Soňa. *Měření průtoků tekutin - principy průtokoměrů* [online]. Ústav automatizace, měření a kybernetiky VUT Brno : 4.2.2008 [cit. 2015-10 - 01]. Tzb-info. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutinprincipy-prutokomeru>.
- [6] Frenzel, F a kolektiv. *Industrial Flow Measurement Basics and Practics* [online]., 16. s [cit. 2015-03-02] Dostupné z WWW: [http://www09.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/03df4b70c2deafae85257bc70054e19b/\\$file/Industrial%20Flow%20Measurement\\_Basics%20and%20Practice.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/03df4b70c2deafae85257bc70054e19b/$file/Industrial%20Flow%20Measurement_Basics%20and%20Practice.pdf)
- [7] CCI Propagation Materials - *DRAG 100D Control Valve* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.cci-japan.co.jp/products/pdfs/cci/201.pdf>
- [8] CCI Propagation Materials - *DRAG 100 DPC DRAG® Produciotn Wellhead Choke* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ccivalve.com/~media/Files/C/CCI/pdf/945-cci-100dpc-drag-production-wellhead-choke-new-construction.pdf>
- [9] CCI Propagation Materials – *DRAG 800D Control Valves for Severe Service Applications* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ccivalve.com/~media/Files/C/CCI/pdf/326-drag-800d-control-valves-for-severe-service-applications.pdf>
- [10] CCI Propagation Materials – *CCI DRAG 100DSV Spray Water Control Applications* [online] Dostupné z WWW: <http://www.cci-japan.co.jp/products/pdfs/cci/316.pdf>
- [11] BS EN 60534. Industrial-process control valves. Flow capacity. Sizing equations for fluid flow under installed conditions. 2011. British Standard Institution. London. 20 s.
- [12] Interná procedúra spoločnosti IMI CCI – *Flow Capacity Tests of Valves/ Disk Stacks/ Cages using air as the flow media for  $C_v \leq 10$* . Specification No.: TP-522
- [13] Clean Compressed Air – The Norgren guide to effective air preparation [online]. Dostupné z WWW: [http://cdn.norgren.com/pdf/en\\_clean\\_compressed\\_air.pdf](http://cdn.norgren.com/pdf/en_clean_compressed_air.pdf)
- [14] Norgren – VP60 5/3 Proportional directional control valve [online].

- Dostupné z WWW: [http://cdn.norgren.com/pdf/N\\_en\\_6\\_6\\_060\\_VP60.pdf](http://cdn.norgren.com/pdf/N_en_6_6_060_VP60.pdf)
- [15] Norgren – 95000 2/2 Electromagnetic actuated, directly controlled [online]. Dostupné z WWW: [http://cdn.norgren.com/pdf/N\\_en\\_5\\_4\\_304\\_95000\\_EPN.pdf](http://cdn.norgren.com/pdf/N_en_5_4_304_95000_EPN.pdf)
- [16] OMEGA - *Quick Disconnect Thermocouples with Miniature Connectors* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.omega.com/pptst/JMQSS.html>
- [17] KADLEC, Karel. *Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 3)*, [online]. Automa, 2006, č.10, 5 s. [cit. 2015-05-04] Dostupné z WWW: <http://automa.cz/download/au120630.pdf>
- [18] JENČÍK, Josef, Jaromír VOLF a kolektiv. 2003. *Technická Měření*. Praha: Nakladatelství ČVUT.
- [19] SmartTrak® Series 100 - *Mass Flow Meters and Controllers Instruction Manual* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.sierrainstruments.com/userfiles/file/manuals/100-series-instruction-manual.pdf>
- [20] OMEGA - *Mass and Volumetric Gas Flowmeters for Clean Gases – FMA-1600A Series* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.omega.com/Green/pdf/FMA1600.pdf>
- [21] Bronkhorst IN – *FLOW Industrial Style Digital Flow Meters and Controllers for Gases* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.bronkhorst.com/files/downloads/brochures/folder-in-flow.pdf>
- [22] Bronkhorst MassView Flowmeter [online]. Dostupné z WWW: <http://www.bronkhorst.com/files/downloads/brochures/massview.pdf>
- [23] KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 1)* [online]. Automa, 2007, č.2, 28, 29 s. [cit. 2015-05-03] Dostupné z WWW: <http://automa.cz/download/au020728.pdf>
- [24] KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 2)* [online]. Automa, 2006, č.10, 25,26,27,28 s. [cit. 2015-05-03] Dostupné z WWW: <http://automa.cz/download/au070725.pdf>
- [25] OMEGA – *Digital Pressure Gauges with Metric Fittings and Ranges* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.omega.com/pressure/pdf/DPGM409.pdf>
- [26] Senzory CZ – Snímač tlaku SenzoMitter AS [online]. Dostupné z WWW: [http://senzory.eu/assets/files/katalog/Snimac\\_tlaku\\_SenzoMitter%20AS\\_economy.pdf](http://senzory.eu/assets/files/katalog/Snimac_tlaku_SenzoMitter%20AS_economy.pdf)
- [27] BHV Senzory – Snímače tlaku DMP 331, DMP 333 [online]. Dostupné z WWW: <http://www.bhvsenzory.cz/data/products/file/dmp331.pdf>
- [28] Bernhard Kotesovec – CV Test Fixture Design. Interná dokumentácia spoločnosti IMI CCI.
- [29] National Instruments. *NI CompactDAQ – USB Data Acquisition Systems* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-178>

- [30] National Instruments – *Operating Instructions and Specifications NI 9203* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374070c.pdf>
- [31] National Instruments – *Operating Instructions and Specifications NI 9265* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374067e.pdf>
- [32] National Instruments – *Operating Instructions and Specifications NI 9219* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374473e.pdf>
- [33] National Instruments – *Operating Instructions and Specifications NI 9375* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374644b.pdf>
- [34] SMITH, by Steven W. 1999. The scientist and engineer's guide to digital signal processing. 2nd ed. San Diego, Calif. ISBN 09-660-1767-6.

## 13 Zoznam použitých skratiek a symbolov

$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$\Delta t$	doba prúdenia tekutiny	[s]
$R_e$	Reynoldsové číslo	[-]
$\rho$	hustota tekutiny	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$D$	priemer trubice, str. 6	[m]
$v$	rýchlosť prúdenia tekutiny	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\eta$	dynamická viskozita tekutiny	[N.s.m <sup>-2</sup> ]
$p$	tlak	[pa]
$m$	hmotnosť	[kg]
$Q_m$	hmotnostný prietok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$Q_v$	rýchlostný prietok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$w$	stredná rýchlosť prúdenia tekutiny	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$N$	počet zatačiek labyrintu	
$v_1$	rýchlosť prúdenia tekutiny na vstupe	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_2$	rýchlosť prúdenia tekutiny na výstupe	[ms <sup>-1</sup> ]
$A$	konštanta	[s <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> .J <sup>-2</sup> ]
$c_p$	merné teplo	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$P$	tepelný príkon	[J.s <sup>-1</sup> ]
$a$	konštanta prestupu tepla do okolia pri $Q_m = 0$	
$b$	konštanta závislá na vlastnostiach tekutiny, geometrii čidla teploty	
$I$	elektrický prúd	[A]
$Y$	expanzný faktor	[-]
$C_v$	prietokový koeficient	[-]
$N_7$	konštanta	[-]
$Q_v$	objemový prietok	[slpm]
$p_1$	tlak meraný na vstupe testeru	[barA]
$G_g$	molárna hmotnosť vzduchu	[g/mol]
$T$	teplota média	[K]
$x$	pomer diferenčného tlaku	[-]
$C$	kapacita	[F]
$\varepsilon_o$	permitivita vákua	[F.m <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_r$	relatívna permitivita	[F.m <sup>-1</sup> ]
$S$	plocha elektród	[m <sup>2</sup> ]
$d$	vzdialenosť medzi elektródami	[m]
$D$	vnútorný priemer testovacej komory, str. 31	[m]
$d$	vonkajší priemer testovanej vzorky	[m]
$B_{FF}$	“body flow constant” $B_{FF} = 21$	[-]
$C_{VFixture}$	prietokový koeficient testeru	
$H$	vnútorná dĺžka testeru	[m]
$h$	výška testovaného vzorku	[m]

$m$	Medián, str. 42
$P$	interval hodnôt
$X$	vzorky

# 14 Zoznam obrázkov

Obr. 2.1: Izoterma ideálneho plynu vľavo, izochora a izobara ideálneho plynu vpravo [1].....	3
Obr. 2.2: Laminárne prúdenie a jeho rýchlostný profil [6].....	6
Obr. 2.3: Turbulentné prúdenie a jeho rýchlostný profil [6].....	7
Obr. 3.1: Následky pôsobenia vysokého tlaku a nekontrolovanej rýchlosti prúdenia tekutiny [7,8].....	8
Obr. 3.2: Zobrazenie kovového disku atmosférického rezistoru .....	8
Obr. 3.3: Jednostupňový a viacstupňový princíp znižovania tlaku [9].....	9
Obr. 3.4: Charakteristika redukcie tlaku pomocou kliečky (vľavo) a disk-stacku (vpravo) [10].....	9
Obr. 4.1: Koncept testovacej zostavy na meranie prietokového koeficientu podľa procedúry CCI TP-522 [12].....	12
Obr. 4.2: Koncept testovacieho zariadenia.....	12
Obr. 5.1: Regulátor tlaku vzduchu (vľavo), filter vzduchu (vpravo) [13].....	14
Obr. 5.2: Konektor proporcionálneho ventilu VP-60, pneumatická značka a zobrazenie samotného ventilu [14] .....	15
Obr. 5.3: Zobrazenie a pneumatická značka elektromagnetického sedlového ventilu [15].....	15
Obr. 5.4: Termočlánok OMEGA typu T [16].....	16
Obr. 5.5: Kalorimetrický hmotnostný prietokomer [17].....	17
Obr. 5.6: Hmotnostný termoanemometer [11].....	17
Obr. 5.7: Prietokomer SmartTrak® Series 100 .....	18
Obr. 5.8: Prietokomer OMEGA FMA – 1600 a jeho vnútorná štruktúra [20] .....	19
Obr. 5.9 : Bronkhorst EL-FLOW® Series .....	20
Obr. 5.10: Prietokomer Bronkhorst MASS-VIEW a použité piny potrebné k zberu dát. [22].....	21
Obr. 5.11: Tlakomer s potenciometrickým senzorom polohy (vľavo). Tlakomer s indukčným senzorom polohy (vpravo) [24].....	23
Obr. 5.12: Schéma kapacitného snímača tlaku a závislosť kapacity na polohe elektród [24].....	23
Obr. 5.13: Piezoelektrický snímač tlaku [17] .....	24
Obr. 5.14: Snímač tlaku OMEGA DPGM409 .....	25
Obr. 5.15: Absolútny tlakomer SenzoMitter AS a jeho zapojenie [26].....	25
Obr. 5.16: Snímač tlaku BHV DMP 331 .....	26
Obr. 5.17: Finálna realizácia pneumatického obvodu .....	27
Obr. 6.1: Testovacia vzorka atmosférického rezistoru .....	29
Obr. 6.2: Koncept testovacieho zariadenia pre $CV > 10$ .....	30
Obr. 6.3: Spôsob uchytenia atmosférického rezistoru v testovacom bubne .....	30
Obr. 6.4: Návrh prvej verzie testovacej komory.....	31
Obr. 6.5: Optimalizovaná verzia testovacej komory .....	32
Obr. 6.6: Finálny návrh testovacieho zariadenia .....	32
Obr. 6.7: Finálna podoba vyrobeného testovacieho zariadenia .....	33
Obr. 7.1: cDAQ 9174 [29] .....	34
Obr. 7.2 : Zapojenie snímačov s prúdovým výstupom do karty NI 9203 [30].....	35
Obr. 7.3: Zapojenie proporcionálneho ventilu na kartu NI 9265 ovládaného prúdovým signálom [31] .....	35
Obr. 7.4: Zapojenie napäťového analógového výstupu prietokomeru Bronkhorst a termočlánku typu $T$ na kartu NI 9219 [32] .....	36

Obr. 7.5 : Zapojenie elektromagnetických sedlových ventilov na digitálne výstupy karty NI 9375 [33] .....	36
Obr. 7.6: Zapojenie meracej časti. Pozícia 1 – zdroj 24 Vdc; 2 – cDAQ – 9174; 3 – rozvod 230 AC; 4 – napájací zdroj cDAQ – 9174 s modulmi; 5 – svorkovnice.....	37
Obr. 8.1: Beh program vytvoreného pomocou metódy event-driven programming .....	39
Obr. 8.2: Udalosť Start (vľavo) a udalosť stop vpravo.....	39
Obr. 8.3: Udalosť Exit vľavo a udalosť Panel Close vpravo .....	39
Obr. 8.4: Čítanie analógových vstupov, filtrácia a scaling signálu .....	40
Obr. 8.5: Základne blokové schéma spracovania signálu [33] .....	40
Obr. 8.6: Pôvodný (modrá) a filtrovaný (červená) prúdový signal snímačov .....	41
Obr. 8.7: Vytvorenie adresára Logged Data a textového súboru Acquisition Data .....	42
Obr. 9.1: Závislosť pomeru diferenčného tlaku a prietokového koeficientu .....	44
Obr. 9.2: Záznam priebehu meraných veličín a ukážka poklesu prietoku.....	44
Obr. 10.1: Zariadenie na testovanie funkčnosti atmosférických rezistorov.....	46

## 15 Zoznam tabuliek

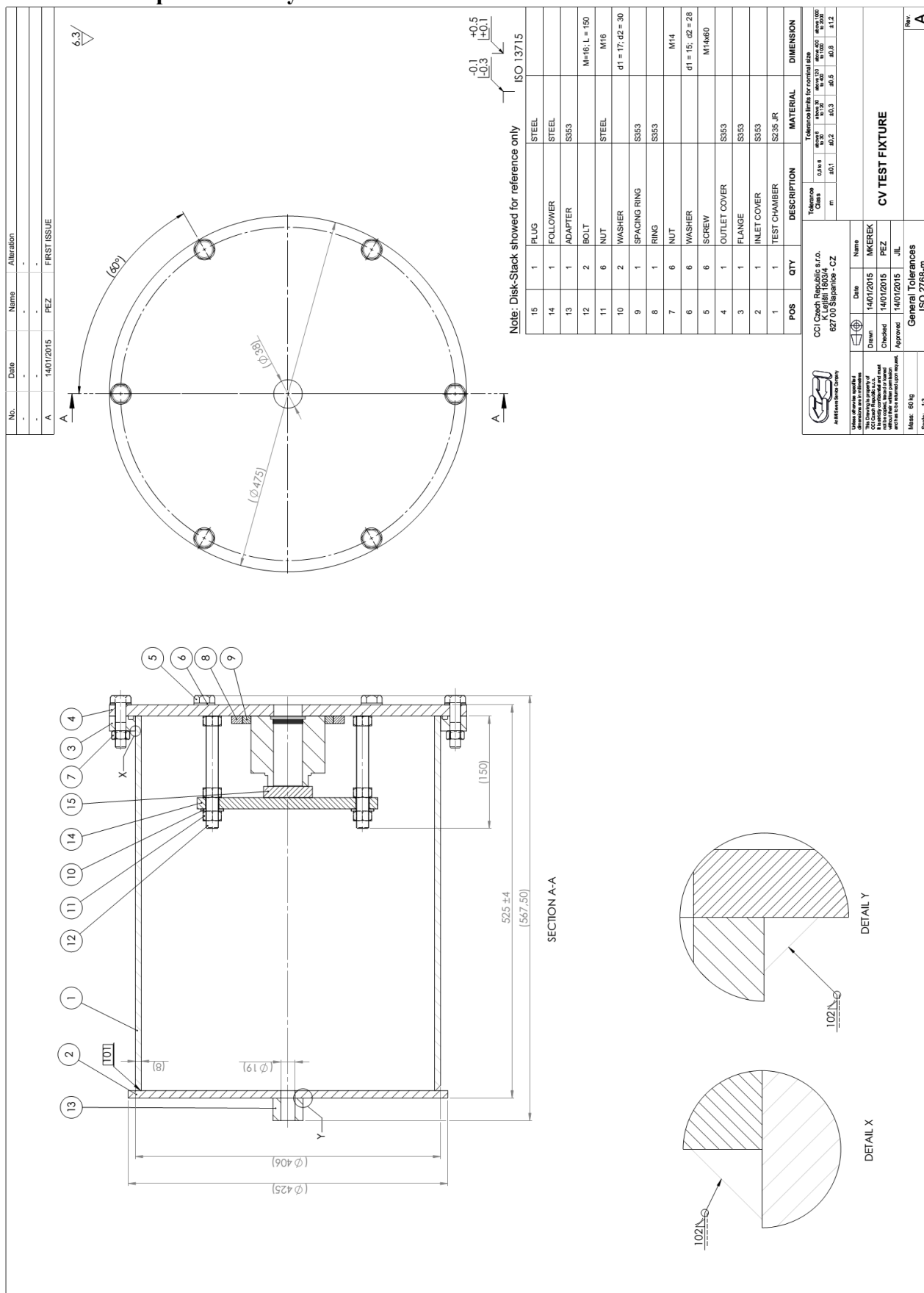
Tabuľka 2.1: Štandardné podmienky merania plynu.....	4
Tabuľka 3.1: Porovnanie tlaku na výstupnej strane rezistoru pre plyny a kvapaliny P. 10	
Tabuľka 5.1: Zhrnutie parametrov prietokomeru SmartTrak® Series 100 .....	19
Tabuľka 5.2: Zhrnutie parametrov prietokomeru OMEGA FMA-1600 A.....	20
Tabuľka 5.3: Zhrnutie parametrov prietokomeru Bronkhorst EL-FLOW ® Series .....	20
Tabuľka 5.4: Zhrnutie parametrov prietokomeru Bronkhorst MASS-VIEW.....	21
Tabuľka 5.5: Zhrnutie parametrov snímača tlaku OMEGA DPGM409 .....	25
Tabuľka 5.6: Zhrnutie parametrov snímača SenzoMitter AS .....	26
Tabuľka 6.1: Rozmery atmosférických rezistorov, ktoré možno testovať .....	29
Tabuľka 9.1: záznam priebehu merania.....	43
Tabuľka 10.1: Parametre testeru .....	45
Tabuľka 10.2: Nacenenie výroby testovacieho zariadenia .....	45



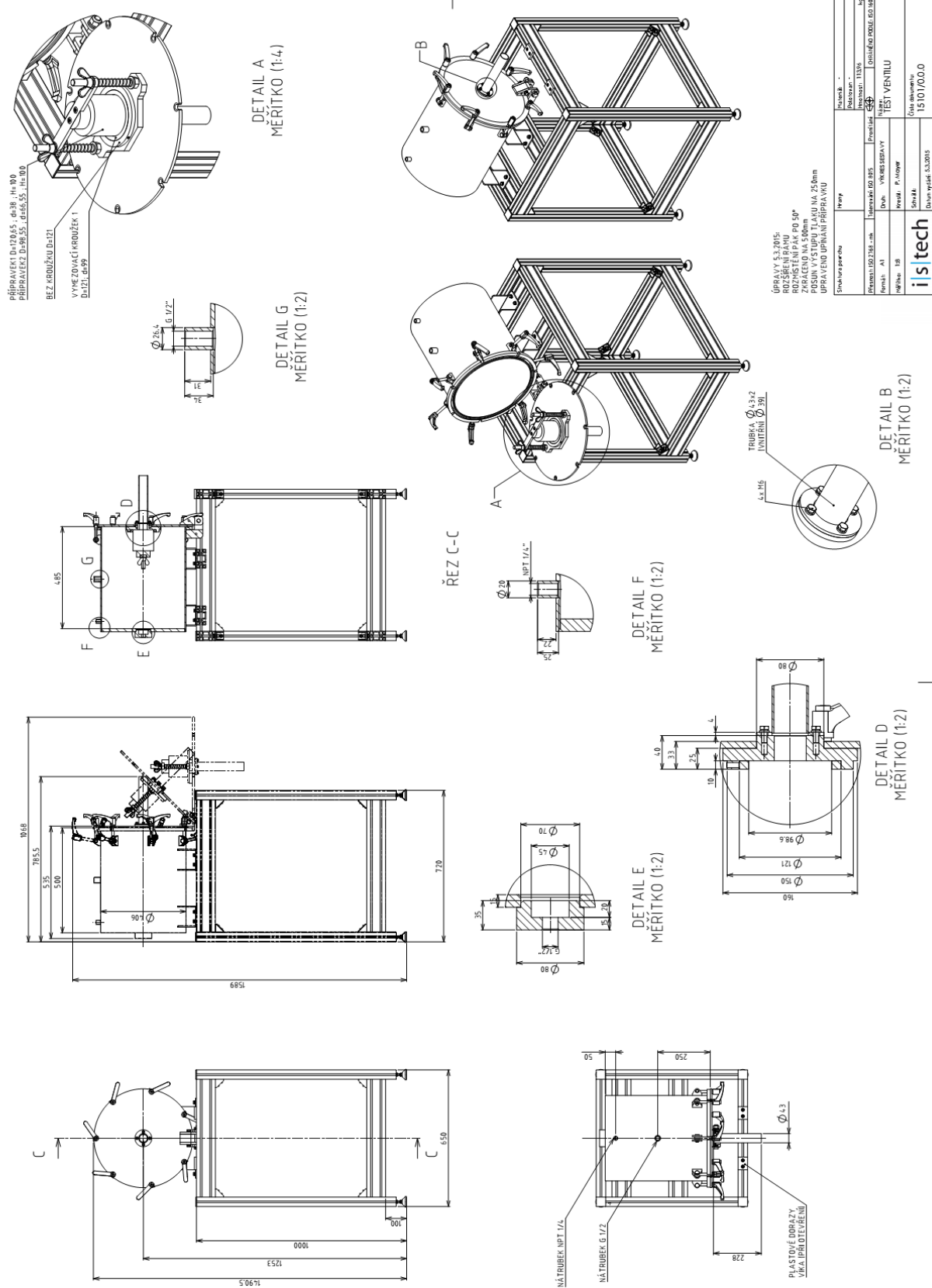
## Príloha 1: Pôvodný návrh testovacieho zariadenia

56

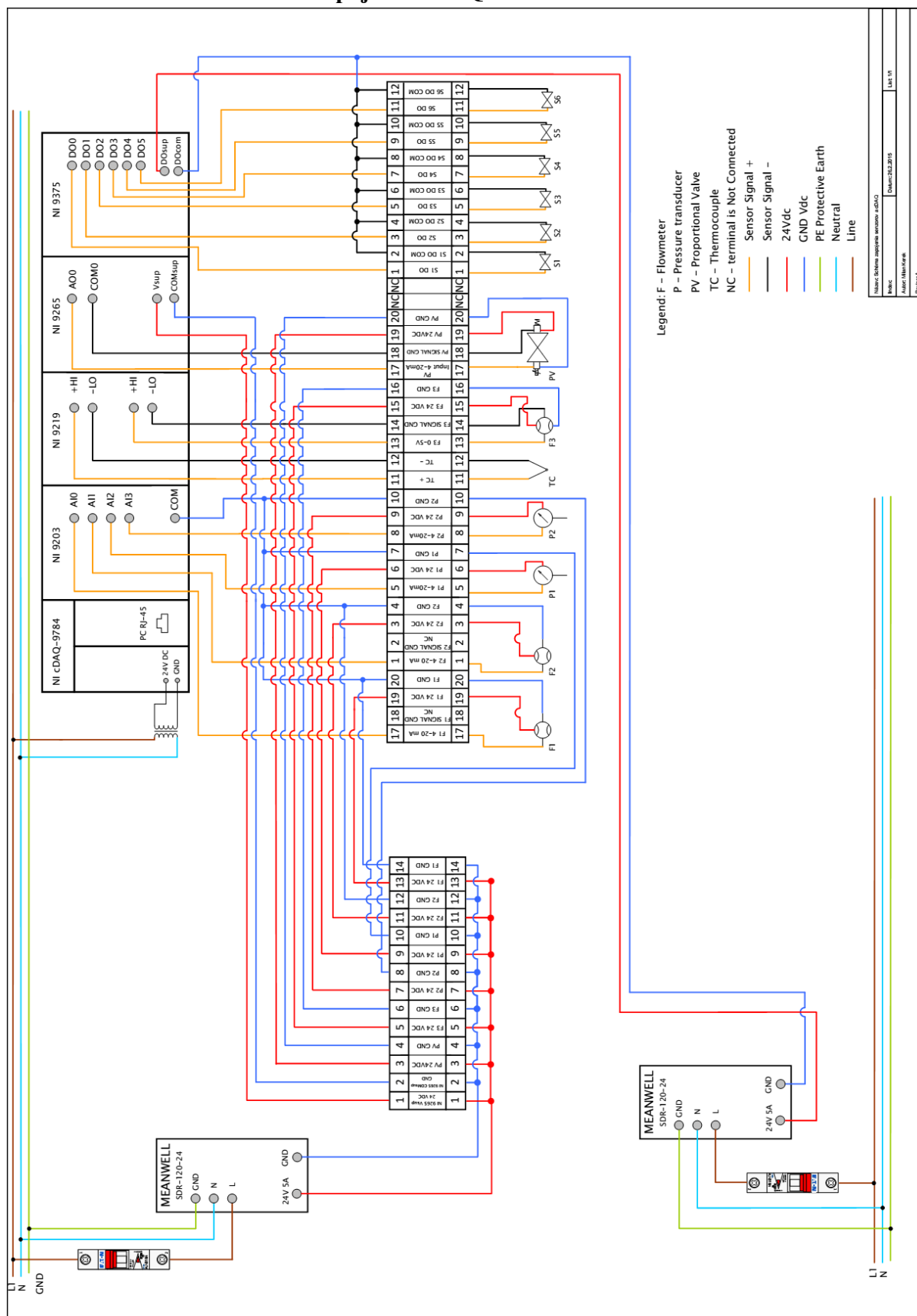
## Príloha 2: Optimalizovaný návrh testovacieho zariadenia



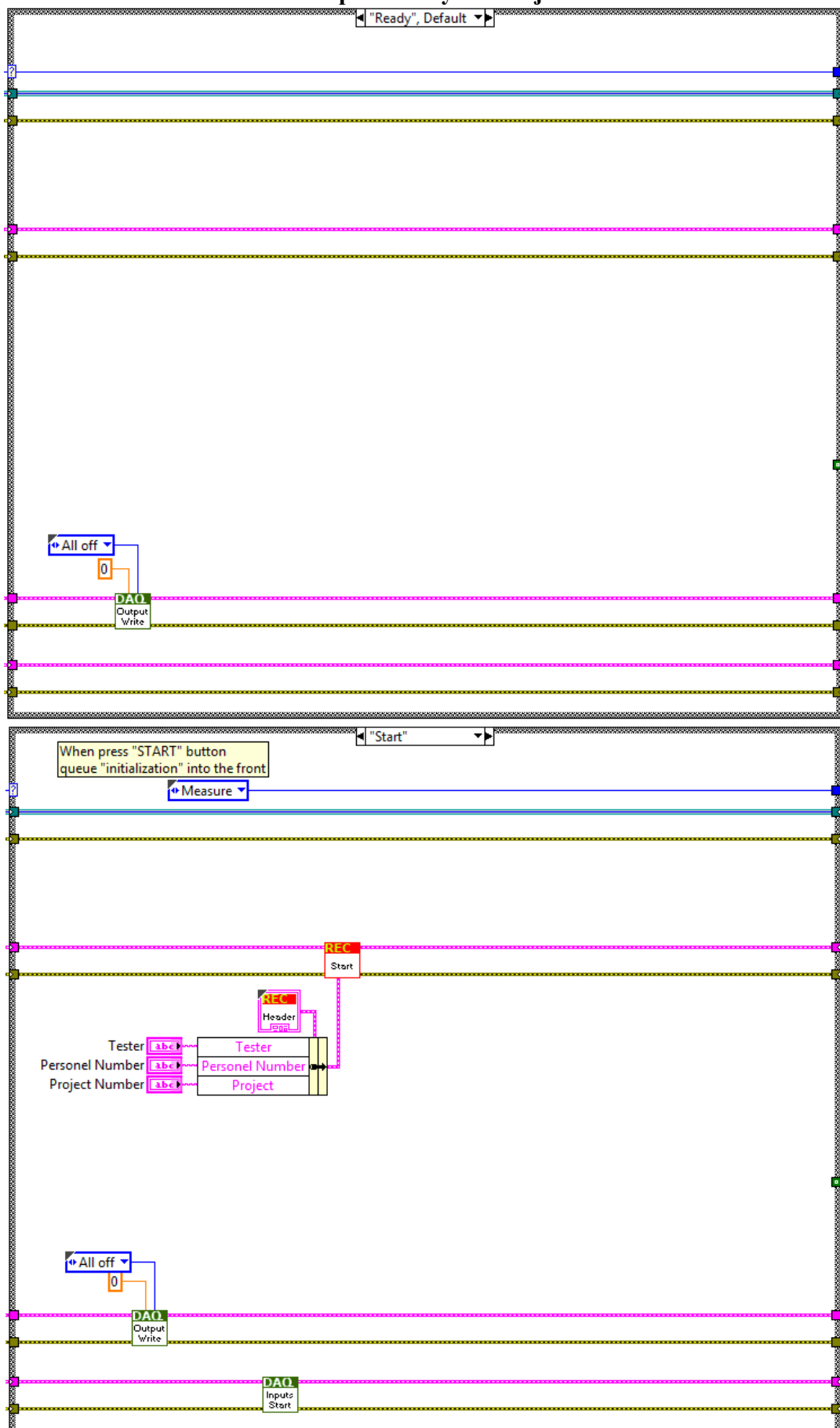
### Príloha 3: Finálny návrh testovacieho zariadenia

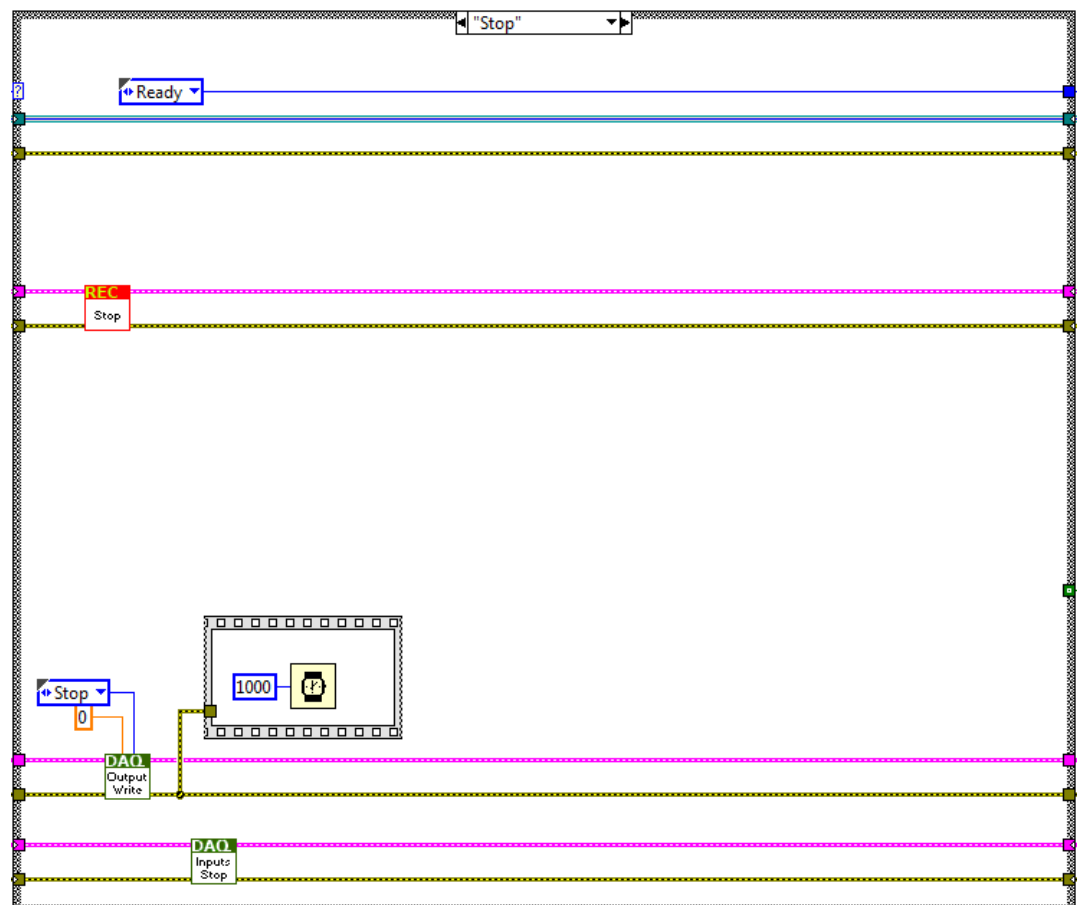
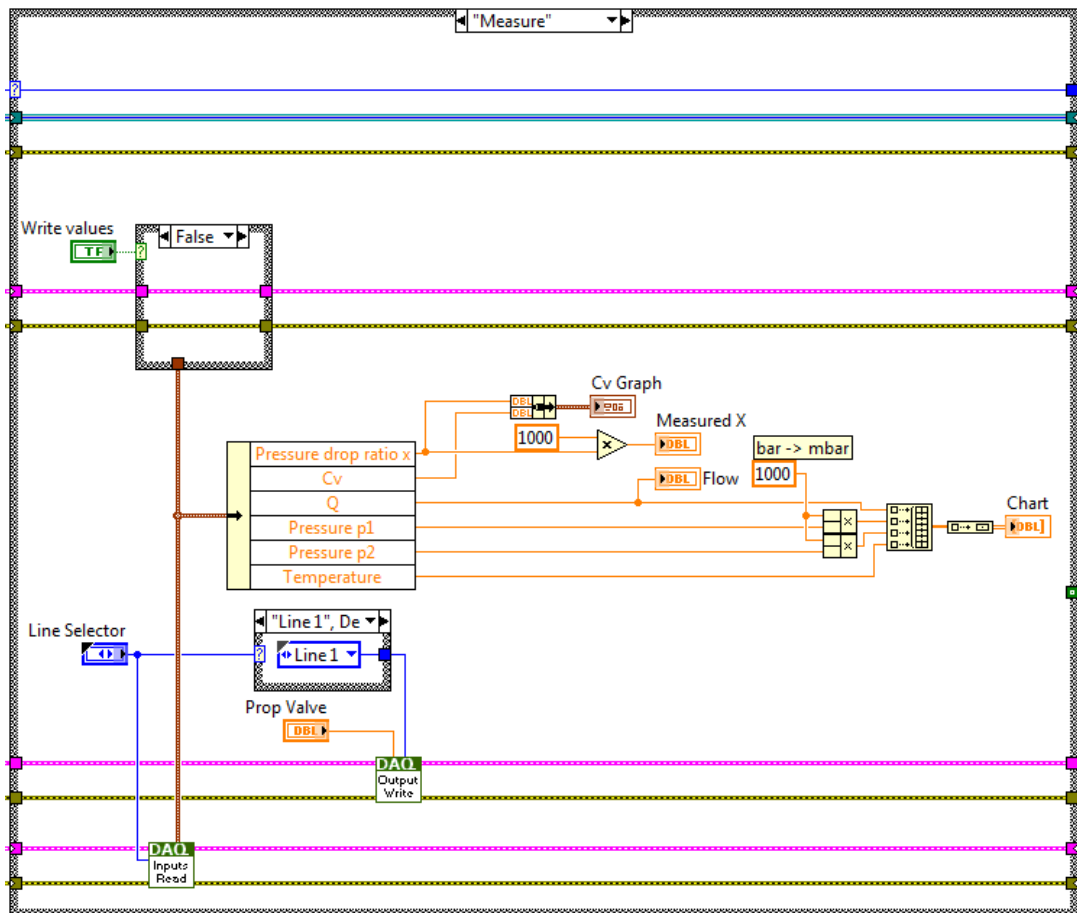


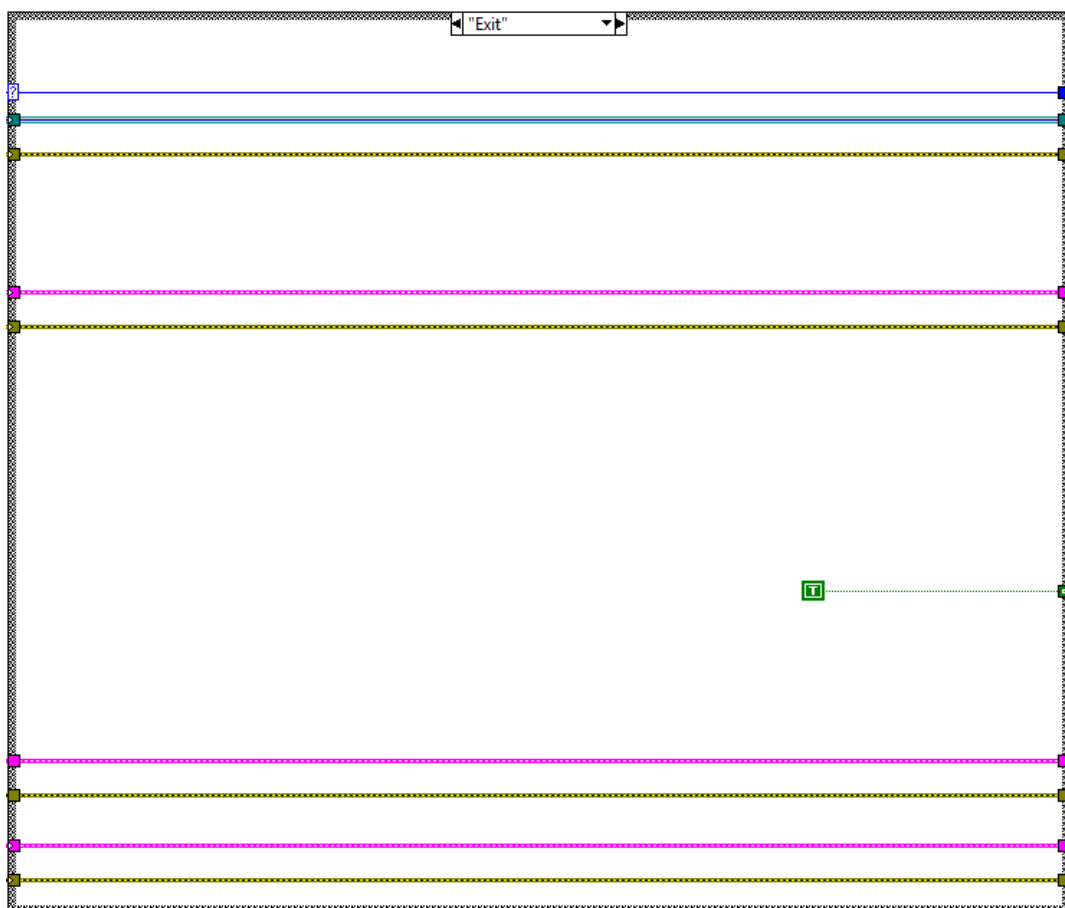
## Príloha 4: Elektrické schema zapojenia cDAQ a snímačov



## Príloha 5: Zobrazenie stavov aplikácie vytvorenej v LabVIEW







## **Píloha 6 – CD**

Priložené CD obsahuje nasledujúce položky:

CV Test Fixture Software – software vytvorený v LabVIEW

CV Test Fixture - .EXE application - .exe súbor priloženého softwaru

Elektrické schéma zapojenia – elektrické schéma zapojenia

Testovacie zariadenie v1 – model, výkresy, zostava testovacieho zariadenia

Testovacie zariadenie v2 – model, výkresy, zostava testovacieho zariadenia

Testovacie zariadenie v2 –zostava testovacieho zariadenia